

**ESTUDIO MULTITEMPORAL DE LOS NIVELES DE INMISIÓN DE MATERIAL
PARTICULADO (PM2.5 Y PM10) EN LAS CICLORUTAS DE BOGOTÁ D.C,
COLOMBIA**

AUTOR

WENDI YURANI GARZÓN HERRERA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
ESPECIALISTA EN GEOMÁTICA

DIRECTOR

FRANCISCO JAVIER BRICEÑO ZULUAGA



**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA
BOGOTÁ D.C, 5 DE DICIEMBRE DE 2020.**

ESTUDIOMULTITEMPORAL DE LOS NIVELES DE INMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO (PM_{2.5} Y PM₁₀) EN LAS CICLORUTAS DE BOGOTÁ D.C, COLOMBIA

MULTI-TEMPORARY STUDY OF THE IMMISSION LEVELS OF PARTICLE MATTER (PM_{2.5} AND PM₁₀) IN THE BIKE-PATH OF BOGOTA D.C, COLOMBIA

Wendi Garzón Herrera, Ingeniera Ambiental.

u3101520@unimilitar.edu.co

Proyecto Geomática Aplicada, Especialización en Geomática

Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada.

Bogotá D.C, Colombia, 5 de diciembre de 2021.

RESUMEN

Pese a la gran importancia que tiene el fortalecimiento de la bicicleta como medio de movilidad urbana sostenible para la ciudad de Bogotá, son pocos los estudios que se han realizado para evaluar las condiciones ambientales que repercuten en la salud de los biciusuarios, de allí la importancia del desarrollo del presente estudio, que tiene como objetivo mediante métodos geoestadísticos, evaluar de manera multitemporal los niveles de inmisión de material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) a lo largo de los 550 kilómetros de ciclorutas, para lo cual se consideraron los registros anuales obtenidos mediante la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, durante los años 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019. La metodología de investigación se sustentó en el desarrollo de un proceso de análisis geoestadístico, que involucró inicialmente las etapas de análisis exploratorio y análisis estructural de los datos; seguido de una etapa de prueba de interpolaciones espaciales, mediante métodos determinísticos y no determinísticos; y una posterior etapa de validación cruzada de los métodos probados, que aseguró la utilización del método de interpolación de mayor precisión, mediante el cual se realizó el proceso final de predicción espacial, dando como resultado productos cartográficos que representan la categorización de las ciclorutas en función de la afectación por los niveles de fondo de material particulado. Se encontró que los niveles de inmisión de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} alcanzaron el mayor grado de afectación durante los años 2016 y 2017, señalando tramos de ciclorutas asociados a concentraciones que superan los valores de la Guía de Calidad del Aire (GCA) definidos por la OMS y el referente normativo nacional. No obstante, es de resaltar que durante el último año evaluado (2019), se denota una considerable mejoría. El grado de afectación registrado en casi la totalidad de la red de infraestructura de ciclorutas señala una categoría “buena”, la cual se asociada a concentraciones inferiores a los valores GCA y al límite normativo nacional.

Palabras Clave: material particulado, PM_{2.5}, PM₁₀, calidad del aire, ciclorutas, análisis geoestadístico, interpolación, predicción espacial.

ABSTRACT

Despite the great importance of strengthening the bicycle as a means of sustainable urban mobility for the city of Bogotá, few studies have been carried out to evaluate the environmental conditions that affect the health of bicycle users, hence the importance of the development of this study, which aims, through geostatistical methods, to evaluate in a multitemporal way the levels of immission of particulate material (PM_{2.5} and PM₁₀) along the 550 kilometers of cycle routes, for which the annual records were considered obtained through the Air Quality Monitoring Network of Bogotá, during the years 2015, 2016, 2017, 2018 and 2019. The research methodology was based on the development of a geostatistical

analysis process, which initially involved the stages of exploratory analysis and structural analysis of the data; followed by a spatial interpolation test stage, using deterministic and non-deterministic methods; and a subsequent stage of cross-validation of the tested methods, which ensured the use of the highest precision interpolation method, through which the final spatial prediction process was carried out, resulting in cartographic products that represent the categorization of the bike paths based on of the effect on the background levels of particulate matter. It was found that the levels of immission of particulate matter PM10 and PM2.5 reached the highest degree of affectation during the years 2016 and 2017, indicating sections of cycle routes associated with concentrations that exceed the values of the defined Air Quality Guide (GCA) by WHO and the national regulatory benchmark. However, it is noteworthy that during the last year evaluated (2019), a considerable improvement is denoted. The degree of damage registered in almost the entire network of bike path infrastructure indicates a “good” category, which is associated with concentrations below the GCA values and the national regulatory limit.

Key Words: particulate matter, PM2.5, PM10, air quality, cycle routes, geostatistical analysis, interpolation, spatial prediction.

I. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el más reciente estudio realizado por la Organización Mundial de la Salud, se estima que durante el año 2012 cerca de 7 millones de personas murieron de forma prematura a causa o como consecuencia de la contaminación atmosférica, lo que representa una de cada ocho muertes en el mundo, superando desbordadamente los registros que le antecedian, y posicionándose en el mayor riesgo ambiental a nivel mundial que vulnera la salud de la población (World Health Organization, 2014). Cerca del 94% de dichas muertes se atribuye a enfermedades no transmisibles, como las enfermedades cardiovasculares, accidentes cerebrovasculares, enfermedades pulmonares obstructivas crónicas y cáncer de pulmón; además de infecciones respiratorias agudas (World Health Organization, 2014). Se ve afectada toda la población, pero la susceptibilidad a la contaminación puede variar con la salud o la edad (Organización Mundial de la Salud, 2005). En este orden de ideas el manejo sistemático de la calidad del aire se constituye en una herramienta fundamental para salvaguardar vidas.

Y es que afirma la directora del Departamento de la OMS de Salud Pública, Medio Ambiente y Determinantes Sociales de la Salud “Los riesgos debidos a la contaminación atmosférica son superiores a lo que previamente se pensaba o entendía, en especial para las cardiopatías y los accidentes cerebrovasculares. En la actualidad hay pocos riesgos que afecten tanto a la salud en el mundo como la contaminación atmosférica; las pruebas apuntan la necesidad de medidas concertadas para limpiar el aire que todos respiramos” (World Health Organization, 2014).

Actualmente Bogotá en su estrategia de consolidarse como la “Capital mundial de la bici”, cuenta con la red de infraestructura para movilidad de bicicletas más grande de Latinoamérica, pues cuenta con 550 kilómetros de ciclorutas permanentes y 80 kilómetros de ciclovías temporales (Instituto Distrital de Recreación y Deporte, 2020). Adicionalmente, refiere la mayor cantidad viajes diarios con un estimado de 880.367, representando una participación de 6.6% de la distribución modal de la ciudad, equivalente a casi la mitad de los viajes realizados en auto y además representando un considerable aumento del 78% con respecto al año 2011 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2019). Esto la convierte en una ciudad líder en este medio alternativo de movilidad sostenible, por lo que ocupó el puesto doce en el índice Copenhagenize 2019, siendo la única ciudad en Latinoamérica en recibir este reconocimiento y la mejor calificada, exceptuando Europa (Alcaldía de Bogotá, 2019).

Una de las principales estrategias de la ciudad es darle un lugar a la bicicleta, teniendo en cuenta que no solo genera beneficios en términos de transporte, sino que también es un gran agente de cambio en la reducción de emisiones contaminantes y en el mejoramiento de la calidad del aire de la ciudad (Alcaldía

de Bogotá, 2019). No obstante, dada la inadecuada planeación en el diseño de esta infraestructura, considerando que, por lo general, los bicicarriles están ubicados junto a vías de alto tráfico vehicular y en algunos casos en cercanía a importantes zonas industriales, lo que cuestiona los beneficios de este medio de transporte, dado que los ciclistas experimentan condiciones en la calidad del aire que puede que no resulten ser adecuadas para la realización de actividades físicas (JF. Franco, 2016).

El termino material particulado comúnmente se emplea en referencia a una mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas que se encuentran en el aire. El PM₁₀, representa la masa de las partículas cuyo diámetro varía entre 2,5 y 10 μm , que se componen de sustancias inorgánicas y orgánicas, las cuales provienen de las fuentes de emisión móviles y fijas, en procesos de combustión, y procesos mecánicos, como obras de construcción y resuspensión del polvo en vías. Entre tanto, el PM_{2.5} representa la masa de las partículas cuyo diámetro es inferior a 2.5 μm , compuestas de diferentes sustancias tales como metales pesados u hollín, las cuales provienen de todo tipo de combustiones, incendios forestales, y algunos procesos industriales (Secretaría Distrital de Ambiente, 2019). El material particulado entre PM₁₀ y PM_{2.5} es conocido como respirable ya que puede penetrar los mecanismos de defensa del sistema respiratorio y llegar hasta los bronquios o incluso al alveolo pulmonar. Su efecto sobre la salud humana puede deberse a su tamaño, su composición química y su contenido (Stefanie Ebelt Sarnat, 2006).

La Guía de calidad del aire – GCA 2 (Organización Mundial de la Salud, 2005) establece niveles de inmisión anuales de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente para PM₁₀ y PM_{2.5}. Por su parte, establece objetivos intermedios-1 (OI-1), los cuales corresponden a 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente para PM₁₀ y PM_{2.5}. Adicionalmente, asigna los objetivos intermedios-2 (OI-2), siendo estos respectivamente para PM₁₀ y PM_{2.5} de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por último, se establecen los objetivos intermedios-3 (OI-3), con valores de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivos para PM₁₀ y PM_{2.5}.

Bogotá es la quinta ciudad de Latinoamérica con mayores niveles de contaminación atmosférica (José Ospina Valencia (er), 2019), y en el mundo se sitúa en el ranking 59 por contaminación por PM_{2.5} (IQAir, 2019). En términos de niveles de inmisión de material particulado, durante los años 2015 al 2019, por lo general supera los estándares recomendados por las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud, lo que se ve fuertemente influenciado por fuentes de emisión móviles, las cuales de acuerdo con el inventario de emisiones de Bogotá, constituyen cerca del 54% del total de las emisiones de PM₁₀ y del 75% de las emisiones de PM_{2.5}, mientras que cerca del 39% de emisiones de PM₁₀ y del 22% de PM_{2.5} se asocia a fuentes fijas industriales (Secretaría Distrital de Ambiente, 2017).

De acuerdo con el último Informe Anual de Calidad del Aire, correspondiente al año 2019, la Secretaria Distrital de Salud a partir de los reportes dados por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá – RMCAB, señala que los niveles de inmisión anuales de material particulado menor a 10 μm (PM₁₀), desde el año 2014 hasta el año 2019, han superado significativamente el valor Guía de Calidad del Aire - GCA de la OMS. Entre tanto, con respecto al Objetivo Intermedio-3 (objetivo al año 2030), se denota que desde el año 2014, la ciudad ha superado este objetivo. No obstante, desde el año 2017 se presentan valores que se acercan progresivamente a este valor, mientras que el objetivo Intermedio-1 (asociado con un riesgo de mortalidad a largo plazo alrededor de un 15% mayor que con el nivel de las GCA), la capital históricamente ha presentado valores inferiores. “El ideal de la OMS es que la ciudad llegue a una concentración de material particulado PM₁₀ de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; en 2019, la concentración rondó los 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ” (Secretaría Distrital de Ambiente, 2019).

Ahora bien, en cuanto a los niveles de inmisión anuales de material particulado menor a 2.5 μm (PM_{2.5}), en dicho informe se precisa que desde al año 2015 al año 2019, los registros superan ampliamente el referente GCA de la OMS. Así mismo, el objetivo intermedio-3, desde el 2015 se supera, denotándose que la ciudad para el año 2019, registra una concentración relativamente cercana a dicho objetivo, aunque con respecto al año inmediatamente anterior se denota un retroceso. Entre tanto, que los objetivos

intermedios 1 y 2, denotan cumplimiento. Dado lo anterior, en dicho informe se precisa “En la actualidad, en Bogotá se trabaja para llegar al nivel de concentración ideal recomendado por la OMS, aunque falta aumentar los esfuerzos para cumplir con los objetivos 3 y GCA, se evidencia un aumento en el nivel de cumplimiento respecto al valor Guía de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, cabe anotar que esta fracción de material particulado es una de las que más incidencia tiene en la salud. A finales del año 2019, se registró una concentración de 17.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Secretaría Distrital de Ambiente, 2019).

A nivel nacional, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece mediante la Resolución 2254 del 2017 “Por la cual se adopta la norma de calidad el aire ambiente y se dictan otras disposiciones” niveles máximos permisibles anuales de los contaminantes criterio PM₁₀ y PM_{2.5}, de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. En este sentido, se puede decir que la capital durante los últimos cinco años, en la mayoría de las estaciones de monitoreo de la capital ha señalado conformidad de la normativa nacional (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Sumado a la problemática ya mencionada en cuanto a salud pública, es importante mencionar que, en Bogotá, aunque se ha avanzado de forma importante en el monitoreo de la calidad del aire en superficie, aún hay mucho camino por recorrer, pues el actual número de estaciones de monitoreo (14 en total), resulta insuficiente considerando el área de la ciudad y los diversos y difusos focos de contaminación, lo que a su vez se convierte en un limitante para la investigación. De allí la importancia de la Geoestadística¹ en diversas aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica, mediante métodos de análisis geoestadísticos para la predicción espacial, es decir, estimar o predecir, valores en sitios no muestreados donde no hay información, no obstante, se recalca la importancia de fortalecer el monitoreo sistemático para obtener mejores resultados y productos cartográficos.

Sin embargo, es de resaltar la idoneidad de la metodología de investigación empleada, dado que es la misma metodología que implementó la Secretaría Distrital de Ambiente para predecir la distribución espacial, temporal y tendencias de la calidad del aire en el Distrito, dando resultados positivos en el reporte anual de la calidad del aire (Secretaría Distrital de Ambiente, 2019) y en el desarrollo del sistema de alertas tempranas ambientales de Bogotá.

II. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis multitemporal de los niveles de inmisión de material particulado PM_{2.5} y PM₁₀ (niveles de fondo) a lo largo de las ciclorutas de la ciudad de Bogotá, mediante métodos geoestadísticos de predicción espacial, durante el periodo 2015 - 2019.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Efectuar la predicción espacial y el modelamiento de los niveles de inmisión anuales de material particulado PM_{2.5} y PM₁₀, mediante la validación cruzada de métodos de interpolación determinísticos (IDW y RBF) y no determinísticos (Kriging y CoKriging).
- ✓ Evaluar el grado de afectación asociado a los niveles de inmisión anuales de material particulado PM_{2.5} y PM₁₀, a lo largo de las ciclorutas de la ciudad de Bogotá, durante los años 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019.

¹ Conjunto de herramientas y métodos que permiten interferir la continuidad espacial de una variable aleatoria a partir de las observaciones en un conjunto suficientemente numeroso de puntos de muestreo, y mediante métodos de interpolación, estimar la variable de interés (Boada, 2020).

III. ÁREA DE ESTUDIO

El presente estudio se desarrolló en la ciudad de Bogotá, Distrito Capital de la República de Colombia, la cual se encuentra situada en el centro del país, en la cordillera oriental, sobre la zona septentrional de los Andes, en el borde oriental de la Sabana de Bogotá, aproximadamente a una altura media de 2.625 metros sobre el nivel del mar. La capital del país tiene una extensión aproximada de 33 kilómetros de sur a norte y 16 kilómetros de oriente a occidente y se encuentra situada en las siguientes coordenadas: Latitud Norte: 4° 35'56" y Longitud Oeste de Greenwich: 74°04'51" (Alcaldía de Bogotá, 2017). Limita al sur con los departamentos del Meta (municipios de Guamal y Cubarral) y del Huila (municipio de Colombia), al norte con el municipio de Chía del departamento de Cundinamarca, al oeste con el río Bogotá y los municipios de Cota, Funza, Mosquera, Soacha, Pasca, San Bernardo, Arbeláez, Cabrera y Venecia del departamento de Cundinamarca. Por el este llega hasta los cerros orientales y los municipios de La Calera, Chíaque, Choachí, Gutiérrez, Ubaque, Uneh.

La división administrativa de la ciudad contempla veinte localidades: Usaquén, Chapinero, Santa Fe, San Cristóbal, Usme, Tunjuelito, Bosa, Kennedy, Fontibón, Engativá, Suba, Barrios Unidos, Teusaquillo, Los Mártires, Antonio Nariño, Puente Aranda, La Candelaria, Rafael Uribe Uribe, Ciudad Bolívar y Sumapaz. Por su parte, la zonificación de uso del suelo permitida, de acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial se define mediante las siguientes categorías: suelo urbano, suelo de expansión urbana y suelo rural, clasificación del suelo definida en el artículo 145 “Clases de suelo” del Decreto 190 de 22 de junio de 2004.

Cabe anotar que las ciclorutas que dispone la capital, se sitúan casi en su totalidad en zonas de uso del suelo urbano, por lo que el área de estudio se reduce a esta área en la que en actualmente el distrito dispone de 550 kilómetros de ciclorutas permanentes y 80 kilómetros de ciclovías temporales (Instituto Distrital de Recreación y Deporte, 2020). En la Figura 3.1 se presenta el mapa de ubicación geográfica del área de estudio, que corresponde al área de uso del suelo urbano de la ciudad de Bogotá, allí se incluye la respectiva división administrativa, la zonificación de uso del suelo establecida en el modelo de ordenamiento territorial y la red de infraestructura para la movilidad de bicicletas.

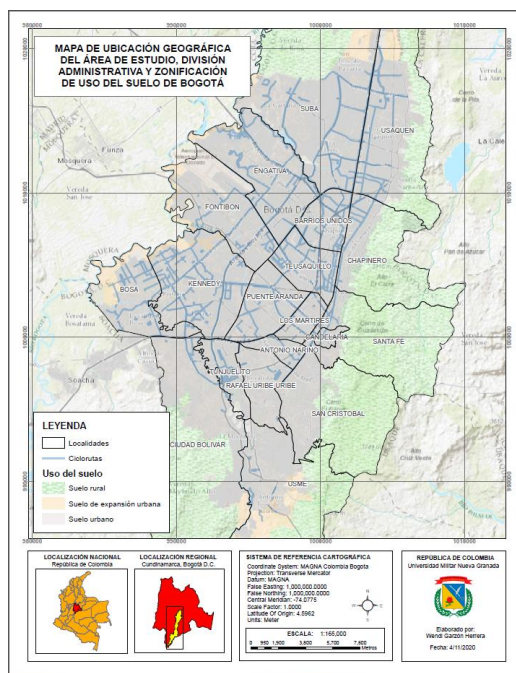


Figura 3.1. Mapa de ubicación geográfica del área de estudio, división administrativa y zonificación de uso del suelo de Bogotá. Elaboración Autor, 2020. Fuente (Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital, 2020).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología de investigación involucró una etapa inicial de adquisición y preprocesamiento de datos, la cual se sustentó en reportes de mediciones de los niveles de inmisión de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}, procedentes de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá – RMCAB; una vez culminada está etapa, dio paso al desarrollo del proceso de análisis geoestadístico mediante herramientas de análisis espacial y de estadísticas del programa ArcGIS® (software líder en Sistemas de Información Geográfica). El cual inició con una etapa de análisis exploratorio de los datos, que se sustentó básicamente en estadísticas descriptivas y análisis de tendencia; seguido de una etapa que involucró el análisis estructural de los datos, determinando la presencia de tendencia, anisotropía, isotropía o de estacionariedad. Consecutivamente, se abordó una etapa probatoria de predicción espacial, en la cual se efectuaron diversas interpolaciones tanto mediante métodos no determinísticos, como Kriging y CoKriging, como por los métodos determinísticos Inverso de la Distancia Ponderada (IDW) y Función Base Radial (RBF), considerando diversos modelos teóricos y transformaciones que permiten mejorar la precisión de las interpolaciones.

En seguida, se desarrolló una etapa de validación cruzada de los métodos probados, la cual permitió mediante comparaciones de los errores de predicción y repeticiones, asegurar la selección del método de interpolación de mejores características en materia de precisión, que representara el mejor modelo geoestadístico para la predicción de los datos. De esta manera, se llegó a la etapa de predicción espacial final, en la cual, mediante el modelo geoestadístico seleccionado anteriormente, se expandió el área de información, es así como, mediante la incorporación de puntos de predicción, se garantizó el cubrimiento de la totalidad área de estudio. Finalizando el proceso de análisis geoestadístico con la obtención de mapas de predicción espacial, que concluyeron la zonificación del área de estudio en función de la dispersión de los niveles de inmisión de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}.

La siguiente etapa correspondió a la asociación de los niveles de inmisión de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} a la red de infraestructura para movilidad de bicicletas. Además, involucró la categorización de las ciclorutas en función de la afectación por niveles de material particulado. El resultado del desarrollo del proceso metodológico se materializa en productos cartográficos finales, que corresponden a los mapas multitemporales del año 2015 al año 2019 del estado de afectación por material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} a lo largo de las ciclorutas de Bogotá. En la **Figura 4.1**, se resume el desarrollo metodológico del presente estudio.

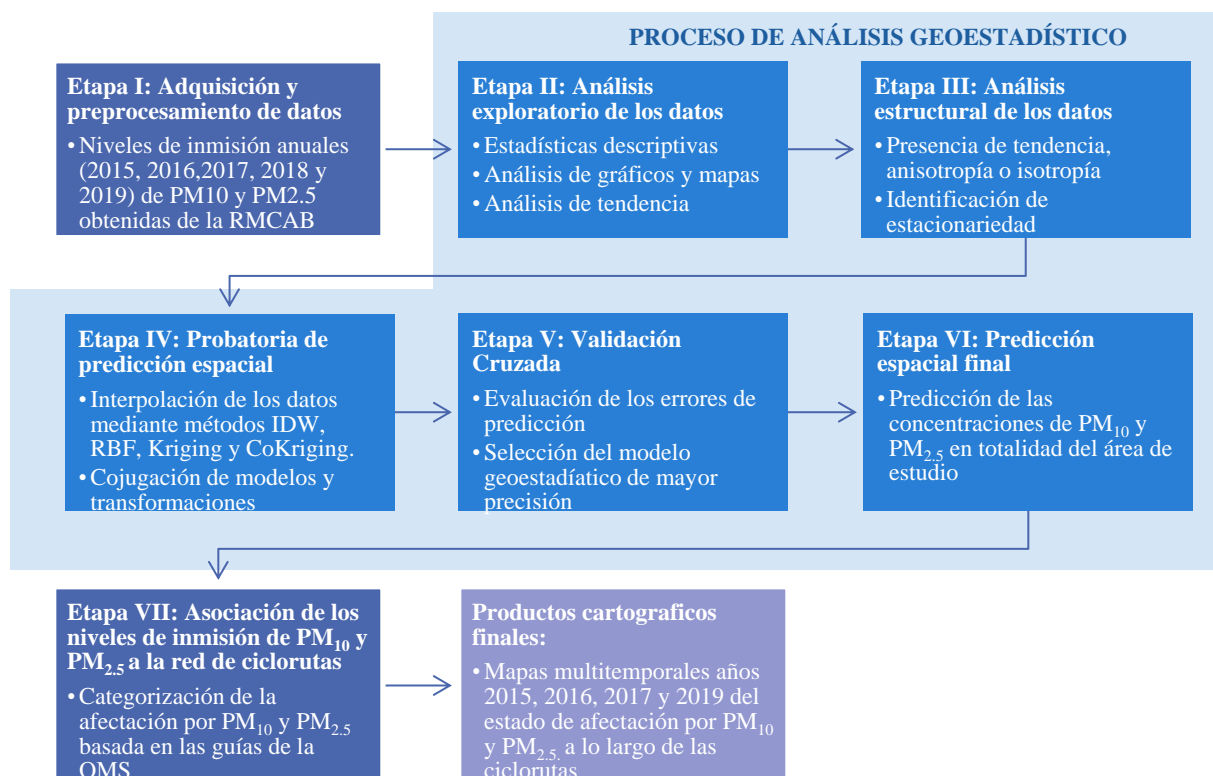


Figura 4.1. Resumen desarrollo metodológico por etapas. Fuente: Elaboración Autor, 2020.

• Etapa I: Adquisición y preprocesamiento de datos

Los datos correspondientes a los niveles de inmisión de material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀), se obtuvieron a partir de mediciones en superficie efectuadas mediante la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB). Red que en la actualidad está definida como un Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire tipo IV – SVCA avanzado² y conformada por un total de catorce estaciones de monitoreo automáticas³, las cuales dan cuenta del estado de la calidad del aire del distrito mediante la medición de los siguientes contaminantes atmosféricos convencionales: partículas suspendidas totales (PST), partículas menores a 10 y 2.5 micrómetros (PM₁₀ y PM_{2.5}), dióxidos de Azufre (SO₂), dióxidos de nitrógeno (NO₂), monóxido de Carbono (CO) y Ozono (O₃).

Además, cuenta con una estación de monitoreo complementaria de medición de las variables meteorológicas que condicionan la dispersión de los contaminantes atmosféricos (precipitación, velocidad y dirección del viento, temperatura, radiación solar, humedad relativa y presión barométrica). Los métodos de medición utilizados por los monitores de la RMCAB se encuentran descritos en la lista de métodos de referencia y equivalentes designados, publicada en diciembre de 2019⁴. Los métodos de referencia se encuentran establecidos en el Título 40 del CFR (*Code of Federal Regulations*), los cuales están aprobados por la *Environmental Protection Agency* (EPA) de Estados Unidos. Cada contaminante

² Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire para zonas metropolitanas en donde la población sea mayor a 1.500.000 habitantes (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

³ Estaciones de monitoreo que no requieren análisis posterior de la muestra tomada; por medio de métodos ópticos y/o eléctricos analizan la muestra directamente proporcionando datos en tiempo real, (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

⁴ United States Environmental Protection Agency. List of designated reference and equivalent methods. December 15, 2019.

cuenta con un método definido de referencia específico, lo cual se encuentra establecido en los apéndices de la Parte 50 del Título 40 del CFR⁵ (Secretaría Distrital de Ambiente, 2019).

En la Tabla 4.1 se resumen los métodos de medición automáticos utilizados en las estaciones de la RMCAB para la determinación de los contaminantes de interés para el desarrollo de la presente investigación (PM₁₀ y PM_{2.5}).

Tabla 4.1. Métodos de medición automáticos utilizados en las estaciones de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá, métodos equivalentes y de referencia EPA.

Contaminante	Principio de medición	Método equivalente automatizado	Apéndice Parte 50 del
PM ₁₀	Atenuación por Radiación	EQPM-0798-122	J
	Beta	EQPM-0404-151	
PM _{2.5}	Atenuación por Radiación	EQPM-0308-170	L
	Beta	EQPM-1013-211	

Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2019).

Por otro lado, en la Tabla 4.2 se presentan las características principales de cada una de las estaciones de monitoreo, incluyendo, las coordenadas de ubicación, elevación, localidad, dirección, tipo de zona de uso del suelo y tipo de estación de medición. Adicionalmente, en la Figura 4.2 se presenta el mapa de distribución de las estaciones de monitoreo.

Tabla 4.2. Características principales de las estaciones de monitoreo, Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá.

Estación	Coordenadas Planas ⁶		Altitud (msnm)	Localidad	Dirección	Zona uso del suelo	Emisiones dominantes
	Este	Norte					
Usaquén	1005225	1012623	2570	Usaquén	Carrera 7B Bis # 132-11	Urbana	De fondo
MinAmbiente	1001168	1003238	2621	Santa Fe	Calle 37# 8-40	Urbana	De tráfico
Carvajal-Sevillana	992113	999936	2563	Kennedy	Autopista Sur # 63-40	Urbana	De tráfico
Tunal	994069	997791	2589	Tunjuelito	Carrera 24# 49-86 sur	Urbana	De fondo
Centro alto rendimiento	999283	1006885	2577	Barrios Unidos	Calle 63# 59A-06	Urbana	De fondo
Las Ferias	999448	1010450	2552	Engativá	Avenida Calle 80# 121-98	Urbana	De tráfico
San Cristóbal	999300	997385	2688	San Cristóbal	Carrera 2 Este# 12-78 sur	Urbana	De fondo
Guaymaral	1003697	1020740	2580	Suba	Autopista Norte# 205-59	Expansión urbana	De fondo
Kennedy	990699	1003191	2580	Kennedy	Carrera 80	Urbana	De fondo
Suba	998230	1018251	2571	Suba	Carrera 111 # 159A-61	Expansión urbana	De fondo
Móvil Cra. 7	1005540	1018598	2578	Chapinero	Avenida Carrera 7 Calle 60	Urbana	De tráfico
Puente Aranda	995564	1003933	2590	Puente Aranda	Calle 10# 65-28	Urbana	Industrial
Fontibón	992894	1008172	2591	Fontibón	Carrera 96G # 17B-49	Urbana	Industrial

Fuente: (Secretaría Distrital de Ambiente, 2019).

⁵ 40 CFR Appendix Table A-1 to Subpart A of Part 53, Summary of Applicable Requirements for Reference and Equivalent Methods for Air Monitoring of Criteria Pollutants. https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/appendix-Table_A-1_to_subpart_A_of_part_53

⁶ Sistema de coordenadas: MAGNA Colombia Bogotá, Proyección: Transversal Mercator, Datum: MAGNA (EPSG 3116).

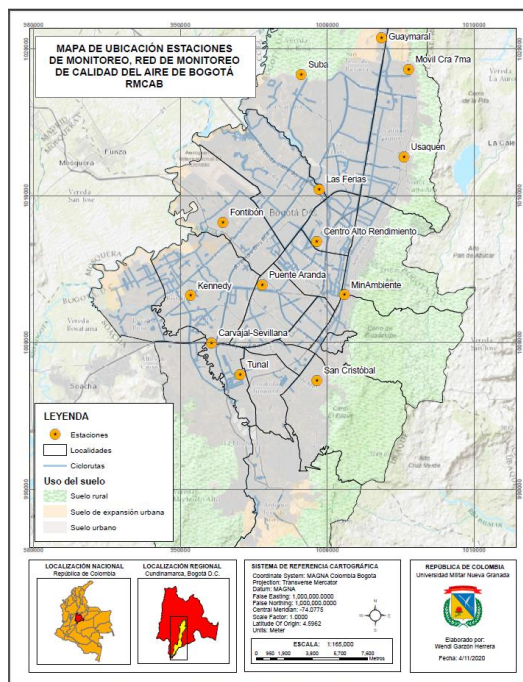


Figura 4.2. Mapa de ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire, Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá. Elaboración Autor, 2020. Fuente (Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital, 2020), (Secretaría Distrital de Ambiente, 2019).

Caber anotar que los niveles de inmisión anuales de PM10 y PM2.5 (promedios anuales) obtenidos para los años 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019, se extrajeron de los respectivos Informes Anuales de la Calidad del Aire de Bogotá (Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, 2015), (Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, 2016), (Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, 2017), (Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, 2018), (Secretaría Distrital de Ambiente, 2019), dispuestos por Secretaría de Ambiente Distrital en el sitio web oficial de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá RMCAB – Publicaciones – Informes Anuales, en la siguiente URL <http://201.245.192.252:81/home/text/1512> (Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, 2020).

Antes de iniciar el proceso geoestadístico se realizó un preprocesamiento o depuración de los datos, con la finalidad de evitar errores asociados a corrupción de datos⁷, datos faltantes⁸, errores de redondeo y duplicación de datos. Para lo cual es pertinente efectuar verificaciones a partir de conteos, estadísticas básicas y valores extremos.

• Etapa II: Análisis exploratorio de los datos

A partir de los datos preprocesados correspondientes a los niveles de inmisión anuales de material particulado - PM10 y PM2.5 (años 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019), se inició el proceso de análisis geoestadístico, con una etapa de análisis exploratorio de los datos. Que consiste en explorar los datos a partir de herramientas, tales como estadísticas descriptivas como las medidas de tendencia central (media, mediana y cuantiles), medidas de dispersión (desviación estándar) y medidas de forma (curtosis y sesgo), así como, la realización y análisis de histogramas, gráficos QQ-plot, diagramas box-plot (caja y bigotes), polígonos de Voronoi (o de Thiessen) y análisis de tendencia (trend) mediante la evaluación

⁷ Errores en los datos informáticos que se producen durante la recuperación de la información.

⁸ Los datos pueden faltar de manera aleatoria o no aleatoria. Los datos faltantes aleatorios pueden perturbar el análisis de datos dado que disminuyen el tamaño de las muestras y en consecuencia la potencia de las pruebas de contraste de hipótesis. Los datos faltantes no aleatorios ocasionan, además, disminución de la representatividad de la muestra (Wedgid, s.f.).

de la nube de puntos del semivariograma experimental o del covariograma. Obteniéndose de esta etapa como principal resultado la identificación de la distribución de los datos, de datos atípicos extremos, de tendencias, evaluación de la autocorrelación espacial, localización de patrones espaciales (esquemas de asociación espacial) y selección de las mejores transformaciones para la normalidad de los datos (si es necesario).

A continuación, en la Figura 4.3 se ilustra el resumen del desarrollo metodológico de la Etapa II: Análisis exploratorio de los datos.

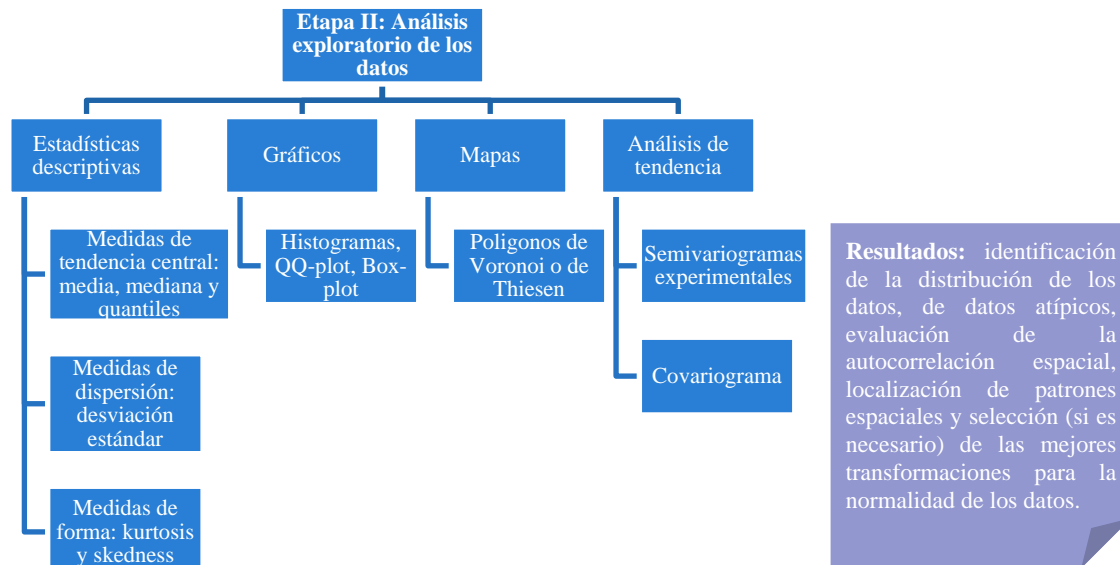


Figura 4.3. Resumen desarrollo metodológico de la Etapa II: Análisis exploratorio de los datos. Fuente: Elaboración Autor, 2020.

- **Etapa III: Análisis estructural de los datos**

La finalidad de esta etapa es determinar si el fenómeno que se estudia se comporta como un proceso estacionario, el cual es definido como un proceso estocástico cuya distribución de probabilidad en un instante de tiempo fijo (o posición fija) es la misma para todos los instantes de tiempo o posiciones. En consecuencia, parámetros tales como la media y la varianza, si existen, no varían a lo largo del tiempo o la posición (JavierMCriado, 2020).

Esta etapa de análisis estructural de los datos, básicamente se sustentó en el ajuste de los variogramas experimentales, utilizando funciones de correlación espacial (a partir de la nube de puntos del semivariograma experimental o del covariograma), en el análisis y evaluación de anisotropía o isotropía (mediante al análisis del semivariograma en diferentes ángulos); dando como resultado principalmente la identificación de la estacionariedad y de la continuidad espacial de los datos. Así como, la existencia o no de la influencia direccional, factores de relevante importancia, dado que determinaron la aplicación (si es necesario) de transformaciones. En seguida en la Figura 4.4 se presenta el resumen del desarrollo metodológico de la Etapa III: Análisis estructural de los datos.

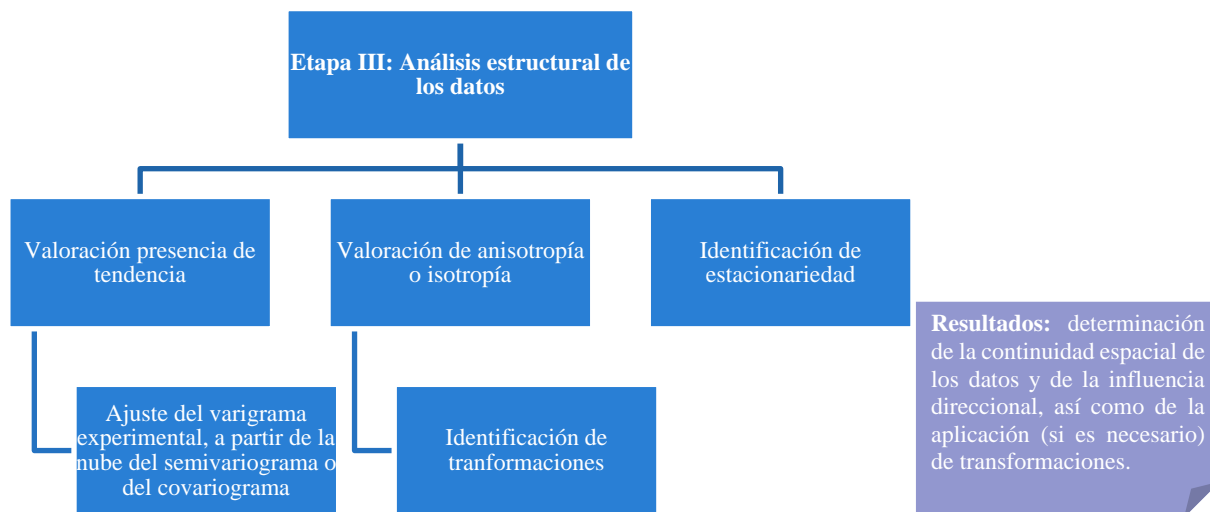


Figura 4.4. Resumen desarrollo metodológico de la Etapa III: Análisis estructural de los datos. Fuente: Elaboración Autor, 2020.

- **Etapa IV: Probatoria de predicción espacial**

Esta etapa involucró la realización y análisis de diversas interpolaciones tanto por métodos no determinísticos, como por métodos determinísticos, así como la probatoria de diversos modelos teóricos y transformaciones box-cox y logarítmicas, siendo el principal insumo para la etapa posterior. En función de la naturaleza de los datos empleados, se decidió emplear como métodos de interpolación el Inverso de la Distancia Ponderada (IDW), Función Base Radial (RBF), Kriging Ordinal, Krigin Universal, Krigin Simple, CoKriging Ordinal, CoKrigin Universal y CoKrigin Simple.

En la Figura 4.5 se presenta el resumen del desarrollo metodológico de la Etapa IV: Probatoria de predicción espacial.

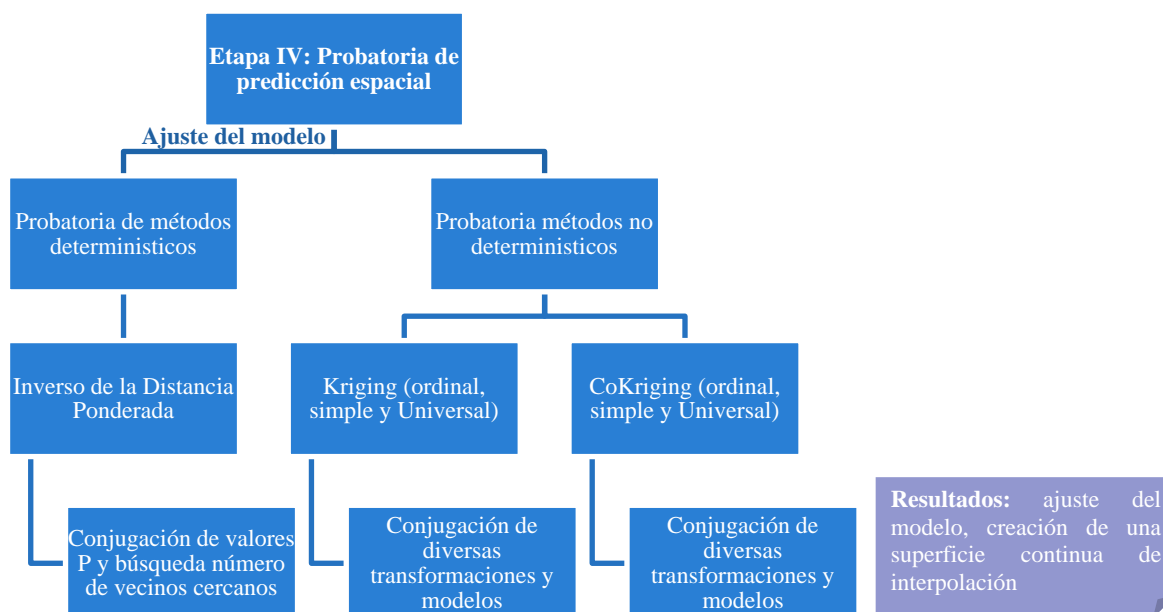


Figura 4.5. Resumen desarrollo metodológico de la Etapa IV: Probatoria de predicción espacial. Fuente: Elaboración Autor, 2020.

- **Etapla V: Validación cruzada de métodos**

La etapa de validación cruzada básicamente permitió validar, comparar y escoger el modelo que proporciona las mejores predicciones, el cual se usará en la posterior etapa para la creación de la superficie continua final. La validación cruzada (*cross validation*), es una herramienta que permite comprobar la validez del modelo e indicar cuál es el mejor (Boada, Métodos no determinísticos: Kriging. Adaptación del libro Análisis exploratorio de datos espaciales Capítulo 10, 2020).

Para todos los puntos, la validación cruzada compara los valores medidos y predichos. En cierto sentido, la validación cruzada "engaña" un poco al usar todos los datos para estimar los modelos de tendencia y autocorrelación. Después de completar la validación cruzada, algunas ubicaciones de datos pueden dejarse de lado como inusuales si contienen grandes errores (Desktop, 2016).

El desarrollo de la etapa de validación cruzada se efectuó con base en la evaluación de los errores de predicción: error cuadrático medio, error cuadrático medio estandarizado y error promedio estándar, utilizando las premisas descritas en (Boada, Métodos no determinísticos: Kriging. Adaptación del libro Análisis exploratorio de datos espaciales Capítulo 10, 2020). En seguida, en la Figura 4.6 se presenta el resumen del desarrollo metodológico de la Etapa V: validación Cruzada.

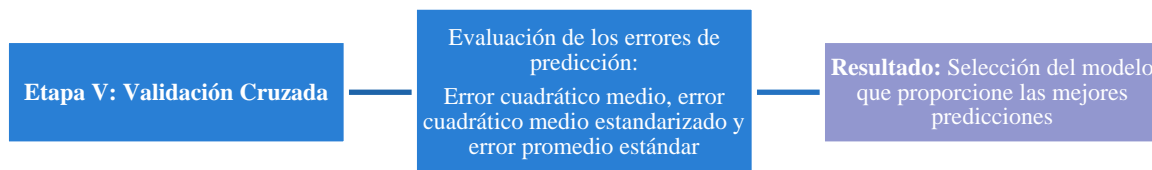


Figura 4.6. Resumen desarrollo metodológico de la Etapa V: Validación Cruzada. Fuente: Elaboración Autor, 2020.

- **Etapla VI: Predicción espacial final**

Una vez identificado el método de interpolación que señale mejores características e idoneidad para la predicción espacial, con la finalidad de ampliar el área de estudio, de tal manera que abarque la totalidad del área urbana y de expansión urbana de la Ciudad de Bogotá (y por ende de las ciclorrutas), se identificaron puntos estratégicos que permitieron garantizar la cobertura total del área de estudio. En los cuales, mediante el mejor método de interpolación, se efectúan predicciones de los niveles de inmisión de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}), para finalmente con estos valores generar las interpolaciones definitivas. Siendo importante mencionar que, para dichas predicciones finales, debido a la adición de puntos y expansión del área de estudio, fue necesario repetir las etapas IV (Probatoria de predicción espacial) y V (Validación Cruzada), de tal manera que el método utilizado para las predicciones definitivas garantice las mejores características y precisión.

En la Figura 4.7 se presenta el resumen del desarrollo metodológico de la Etapa VI: Predicción espacial Final.

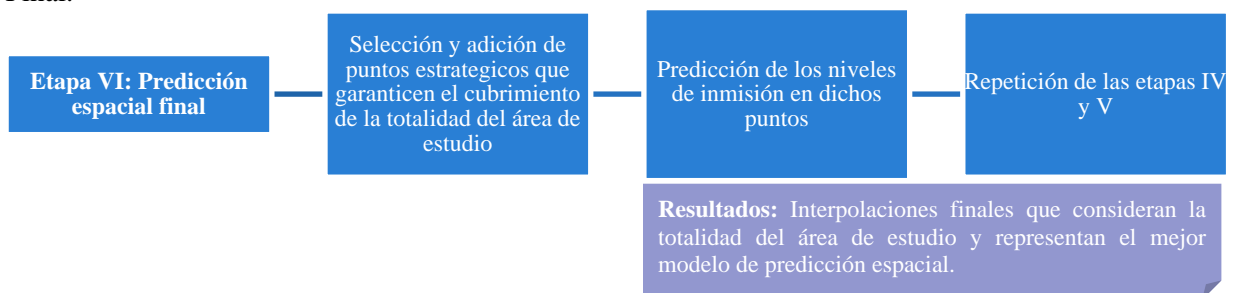


Figura 4.7. Resumen desarrollo metodológico de la Etapa VI: Predicción espacial final. Fuente: Elaboración Autor, 2020.

- **Etapla VII: Asociación a las ciclorrutas**

Esta etapa involucró la asociación de los niveles de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} a la red de infraestructura de ciclorrutas del Distrito. Es de señalar que el trazado de la calzada destinada de manera permanente a la circulación de bicicletas se obtuvo a partir de la plataforma de Datos Abiertos Bogotá de la Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital, dispuesta por la Secretaría Distrital Movilidad, actualizada a fecha del 29 de marzo de 2019 y disponible en la siguiente URL <https://ideca.gov.co/recursos/mapas/ciclorruta-de-bogota> (Unidad Administrativa Especial de Catastro, IDECA, Secretaría de Movilidad, 2020).

Adicionalmente, esta etapa involucró la categorización de la afectación por PM₁₀ y PM_{2.5}, para lo cual, se desarrolló una propuesta para la categorización que se ajustó a los datos. Esto ya que actualmente, las categorías de clasificación del estado de la calidad del aire (como el índice de Calidad del Aire), no consideran concentraciones con respecto a periodos de exposición prolongados (es decir medias anuales), por lo que se propusieron categorías basadas en las guías y objetivos intermedios de la Organización Mundial de la Salud.

- **Productos cartográficos: Mapas multitemporales del estado de afectación por material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} a lo largo de las ciclorutas de Bogotá D.C.**

Los resultados del desarrollo del proceso metodológico se ven materializados en productos cartográficos finales, que corresponden a los mapas multitemporales del año 2015 al año 2019 del estado de afectación por material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}, a lo largo de las ciclorutas de Bogotá. Principal insumo para el análisis y formulación de conclusiones y recomendaciones en relación con las concentraciones de fondo de material particulado a las que se ven expuestos los biciusuarios, orientadas a brindar información para la toma de decisiones en la planificación de la infraestructura urbana de bicicletas y fortalecimiento de este medio de transporte sostenible.

V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

- **Etapla I: Adquisición y preprocesamiento de datos**

A continuación, en la Tabla 5.1, se presentan los resultados producto del preprocesamiento de los datos, correspondientes a los niveles de inmisión promedio anuales de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) para cada año de interés del presente estudio (2015 al 2019), los cuales se extrajeron de los respectivos Informes Anuales de Calidad del Aire de la Red de la Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá – RMCAB, operada por la Secretaria Distrital de Ambiente.

Tabla 5.1. Consolidado, niveles de inmisión anuales de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}, Años 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019.

ID	Estación	Cod	Niveles de inmisión anuales PM ₁₀ (µg/m ³)					Niveles de inmisión anuales PM _{2.5} (µg/m ³)				
			2015	2016	2017	2018	2019	2015	2016	2017	2018	2019
1	Usaquén	USQ	30	42	37	39	24.7	13	17	14	13	14.1
2	MinAmbiente	MAM	34	34	30	28	29.5	15	18	16	14	13.7
3	Carvajal-Sevillana	CSE	87	76	66	69	56	31	30*	28	30	36.1
4	Tunal	TUN	43	50	43	38	33.6	21	23	21	20	16
5	Centro Alto Rendimiento	CDAR	28	35	31	28	27	18	20	15*	14	15.3
6	Las Ferias	LFR	35	40	37	32	28.3	--	19	17	15	15.1
7	San Cristóbal	SCR	26	27	28	26	25	9	10	12	12	11.9*
8	Guaymaral	GYR	31	32	28	28	24.7	14	16	15	14	13.6

ID	Estación	Cod	Niveles de inmisión anuales PM ₁₀ (µg/m ³)					Niveles de inmisión anuales PM _{2.5} (µg/m ³)				
			2015	2016	2017	2018	2019	2015	2016	2017	2018	2019
9	Kennedy	KEN	66	58	55	50	43.7	27	30	27	24	25.1
11	Suba	SUB	47	52	50	46	45.8	22	22*	18	16	16.2
12	Movil Cra 7ma	MOV	--	--	--	39*	51.6*	--	--	--	29	28.3*
13	Puente Aranda	PTE	53	52	47	43	40	--	23*	18	17	18.1*
14	Fontibón	FTB	--	--	--	40*	37.1	--	--	--	14	18.4

--Dato no reportado, debido a la inoperatividad del respectivo equipo de monitoreo para dicho periodo de tiempo.

Niveles de inmisión indicativos, dado que la representatividad de los datos es menor al 75%

Fuente: Informes Anuales de la Calidad del Aire de Bogotá (Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, 2015), (Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, 2016), (Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, 2017), (Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, 2018), (Secretaría Distrital de Ambiente, 2019).

• Etapa II: Análisis exploratorio de los datos

En la Figura 5.1 y Figura 5.2 se expone el comparativo multianual de los niveles de inmisión de material particulado menor a 10 y 2.5 µm registrados en las estaciones de la RMCAB para las temporalidades de los años 2015 al 2019.

De manera general, se puede decir que en la ciudad los niveles de inmisión anuales de PM10 han fluctuado entre 24,4 µg/m³ y 87 µg/m³, resaltándose que, la estación que históricamente se ha caracterizado por alcanzar los mayores registros corresponde a Carvajal-Sevillana (localidad de Kennedy), esto ya que durante el periodo de tiempo evaluado reporta permanente incumplimiento normativo (es decir, niveles superiores a los 50 µg/m³). En seguida se sitúa la estación Kennedy, en la cual del 2015 al 2017 se registran sobrepasos normativos, siendo importante mencionar que estas dos estaciones reflejan mayoritariamente incidencia asociada al alto flujo vehicular cercano.

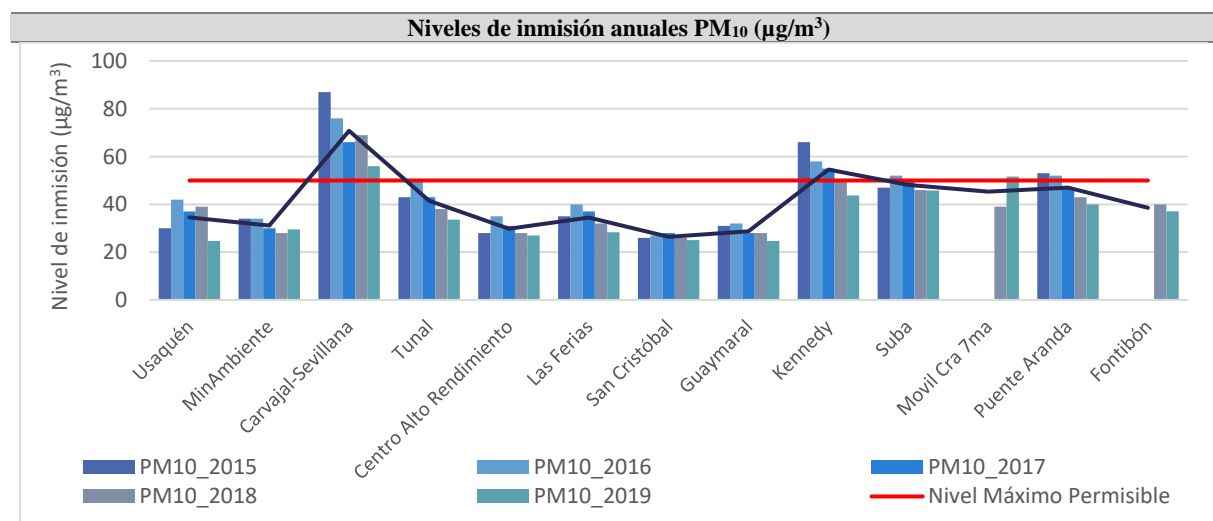


Figura 5.1. Comportamiento multianual de los niveles de inmisión de material particulado en las estaciones de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá Fuente: Elaboración Autor, 2020.

En tercera instancia se lista la estación Puente Aranda, en la cual durante los años 2015 y 2016 se alcanzaron las mayores concentraciones, siendo éstas superiores a la norma aplicable, para esta estación en específico es importante mencionar su relación con la incidencia de carácter industrial. En seguida se citan las estaciones Suba y Móvil Cra 7ma, las cuales respectivamente durante los años 2016 y 2018 ha registrado excedencias normativas. En contraste, las estaciones que históricamente ha reportado los

menores registros (inferiores a $\mu\text{g}/\text{m}^3$), corresponden a San Cristóbal y Guaymaral, esto ya que se ubican en cercanías al perímetro de expansión urbana de la ciudad.

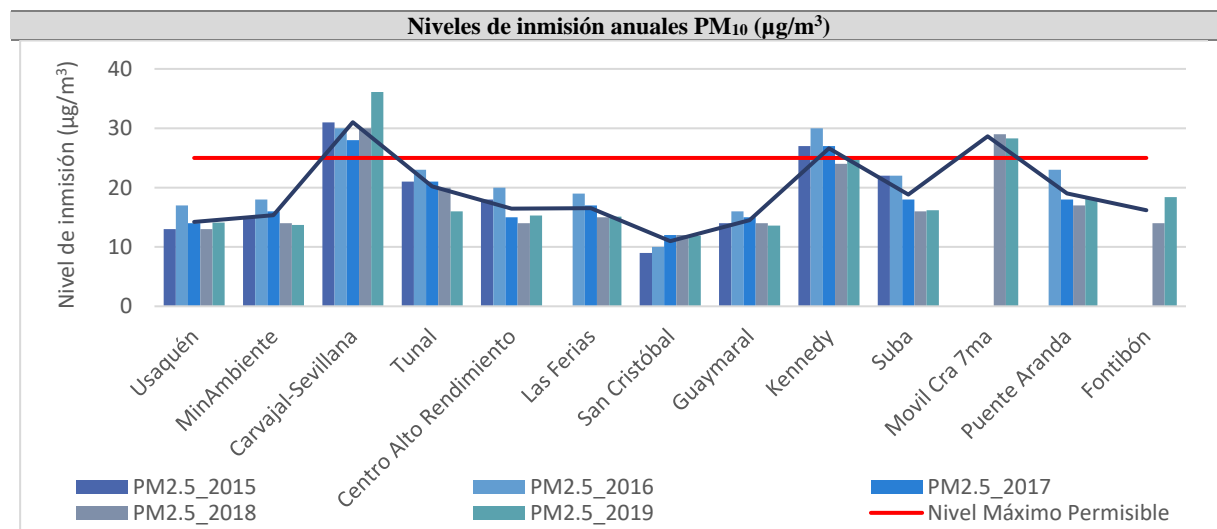


Figura 5.2. Comportamiento multianual de los niveles de inmisión de material particulado en las estaciones de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá. Fuente: Elaboración Autor, 2020

Con respecto al material particulado menor a $2.5 \mu\text{m}$, durante el periodo de estudio las concentraciones han estado comprendidas entre $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $36.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, alcanzándose los mayores registros en las dos estaciones ubicadas en la localidad de Kennedy (Carvajal-Sevillana y Kennedy), en las cuales las concentraciones por lo general superan el límite máximo permisible ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$); seguida de la estación Móvil Cra 7ma, la cual desde su instalación en 2018 y en el 2019, ha registrado sobrepaso de la norma. Dado lo anterior es preciso mencionar que dichos comportamientos estarían mayoritariamente influenciados por fuentes móviles. Entre tanto, la estación de menor incidencia corresponde a San Cristóbal, esto ya que mantiene concentraciones inferiores a los $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En la Tabla 5.2 se presenta un consolidado con los resultados obtenidos de la determinación de las estadísticas descriptivas (medidas de tendencia central, medidas de localización, medidas de dispersión y medidas de forma), obtenidas a partir de las series de datos anuales (año 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019); además allí se exponen los principales hallazgos del análisis distribución y de datos atípicos. A partir del análisis de las estadísticas descriptivas, específicamente del comportamiento de las medidas de tendencia central, se evidencia que las series de datos anuales por lo general registran valores de la media superiores a la mediana, lo anterior siendo un indicio de una distribución asimétrica de los datos. La única excepción se registra para los datos de PM10 del 2016, los cuales señalan un valor medio ligeramente inferior a la mediana.

A hora bien en cuanto a las medidas de dispersión, es de resaltar que a partir del coeficiente de variación es preciso inferir que la mayoría de los datos evaluados señalan una alta variación, esto ya que dicho indicador estadístico por lo general supera el 30%; exceptuando los datos de PM10 correspondientes al año 2015 y los de PM2.5 correspondientes a los años 2016 y 2017, en los cuales se evidencia una variación levemente inferior, esto ya que dichos valores resultan ser ligeramente inferiores al 30%.

Continuando con el análisis de las medidas de forma, a partir del cálculo del skewness (sesgo), es preciso inferir que los datos tanto de PM10 como de PM2.5 de todos los años evaluados presentan una distribución asimétrica positiva, esto ya que dicho indicador resulta ser superior a cero. Además, a partir del análisis de la kurtosis (curtosis), es preciso inferir que los datos de PM10 de los años 2015, 2016 y 2018 y de PM2.5 del año 2019, señalan una distribución Leptocúrtica (más apuntada), esto ya que los

valores obtenidos para la kurtosis son superiores a 3, indicando a su vez los valores más altos para la desviación estándar (medida de la variabilidad absoluta). Entre tanto, las restantes series de datos señalan una distribución Platicútica (aplanada), determinada por valores de kurtosis inferiores a 3, que a su vez coinciden con valores más bajos de desviación estándar.

Como complemento del análisis de las estadísticas descriptivas, para analizar mejor los datos en cuanto a distribución, en la Figura 5.3 se presentan los histogramas de los datos objeto de estudio, los cuales corroboran que todas las series de datos evaluadas presentan una distribución asimétrica positiva.

Dada la incidencia de la distribución asimétrica positiva, surge la necesidad de aplicar ajustes a los histogramas con la finalidad de detectar transformaciones (box cox o logaritmicas) que conlleven a la normalidad de los datos, para así, obtener mejores resultados en las posteriores etapas de predicción espacial. Bajo este contexto, en la Tabla 5.2 se exponen las mejores transformaciones probadas mediante las cuales se logró mejorar la normalidad de los datos, aproximar el skedness a cero y la kurtosis a 3, siendo importante mencionar que estos valores representan información valiosa que se usará posteriormente para ajustar los modelos de predicción.

Tabla 5.2. Resultados consolidados: Estadísticas descriptivas y Análisis exploratorio

Parámetro/año	PM10_2015	PM10_2016	PM10_2017	PM10_2018	PM10_2019	PM2.5_2015	PM2.5_2016	PM2.5_2017	PM2.5_2018	PM2.5_2019
Conteo	11	11	11	13	13	9	11	11	13	13
Mínima	26	27	28	26	24.7	9	10	12	12	11.9
Máxima	87	76	66	69	56	31	30	28	30	36.1
Medidas de tendencia central										
Media	43.636	45.273	41.091	38.923	35.923	18.889	20.727	18.273	17.846	18.608
Mediana	35	42	37	39	33.6	18	20	17	15	16
Moda	--	52	37	28	24.7	--	30	15	14	--
Medidas de localización										
1 cuartil	30.25	34.25	30.25	28	26.5	13.75	17.25	15	14	14
2 cuartil	43.636	45.273	41.091	38.923	35.923	18.889	20.727	18.273	17.846	18.608
3 cuartil	51.5	52	49.25	43.175	44.225	23.25	23	20.25	21	20.075
Medidas de dispersión										
Varianza (muestral)	354.85	200.02	153.29	139.08	115.042	49.86	34.62	26.42	36.97	49.391
Rango	61	49	38	43	31.3	22	20	16	18	24.2
Desviación estándar (muestral)	18.838	14.143	12.381	11.793	10.726	7.0612	5.8837	5.1399	6.0807	7.0279
Error estándar de la media	5.68	4.26	3.73	3.27	2.975	2.35	1.77	1.55	1.69	1.949
Coefficiente de variación	43.17%	31.24%	30.13%	30.30%	29.86%	37.38%	28.39%	28.13%	34.07%	37.77%
Rango intercuartílico	19.50	17.50	18.00	15.00	16.700	8.00	5.50	4.50	6.00	4.300
Medidas de forma										
Skewdness	1.2267	0.16563	0.66595	1.1946	0.55443	0.37731	0.10425	0.92427	1.1014	1.4463
Kurtosis	3.5158	3.0051	2.4096	4.243	2.0037	2.1224	2.6473	2.6714	2.7356	4.0051
Análisis distribución, datos atípicos y transformaciones										
Distribución	Asimétrica Positiva	Asimétrica Positiva	Asimétrica Positiva	Asimétrica Positiva	Asimétrica Positiva	Asimétrica Positiva	Asimétrica Positiva	Asimétrica Positiva	Asimétrica Positiva	Asimétrica Positiva
	Leptocúrtica	Leptocúrtica	Platicúrtica	Leptocúrtica	Platicúrtica	Platicúrtica	Platicúrtica	Platicúrtica	Platicúrtica	Leptocúrtica
Transformación (Histograma)	Box-Cox - 1.6	Box-Cox - 0.3	Box-Cox - 0.9	Box-Cox -1	Box-Cox 0.8	Box-Cox 0.4	Box-Cox 0.9	Box-Cox -1.2	Log	Box-Cox - 0.6
Datos atípicos (Box Plot)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Datos atípicos (QQ Plot)	Carvajal-Sevillana	Carvajal-Sevillana	Carvajal-Sevillana	Carvajal-Sevillana	No	No	No	No	Carvajal-Sevillana y Móvil Cra 7ma	Carvajal-Sevillana
Transformación (QQ Plot)	Box-Cox - 1.3	Box-Cox - 0.3	Box-Cox - 1.3	Box-Cox - 0.8	Box-Cox -1	Box-Cox 0.5	Box-Cox 1.3	Box-Cox -0.6	Box-Cox - 1.5	Box-Cox - 1.6

Fuente: Elaboración Autor, 2020.



Figura 5.3. Análisis exploratorio de los datos – Histogramas. Fuente: Elaboración Autor, 2020.

A continuación, en la Figura 5.4 se presentan los gráficos QQ-Plot y Box Plot; mediante el análisis de los primeros gráficos en mención se logró identificar que algunas series de datos reportaban valores atípicos superiores (es decir, muy alejados de la línea de tendencia), coincidiendo estos principalmente con la estación de monitoreo Carvajal-Sevillana. No obstante, dado el hecho de que a este punto de la ciudad históricamente se le han atribuido y corroborado los mayores niveles de polución por material particulado, sustentado por la alta incidencia vehicular de la zona, se procedió a confirmar la presencia de dichos datos atípicos, esto mediante los gráficos box plot con una configuración de longitud del bigote de 2, que permitió descartar la presencia de valores atípicos extremos superiores e inferiores.

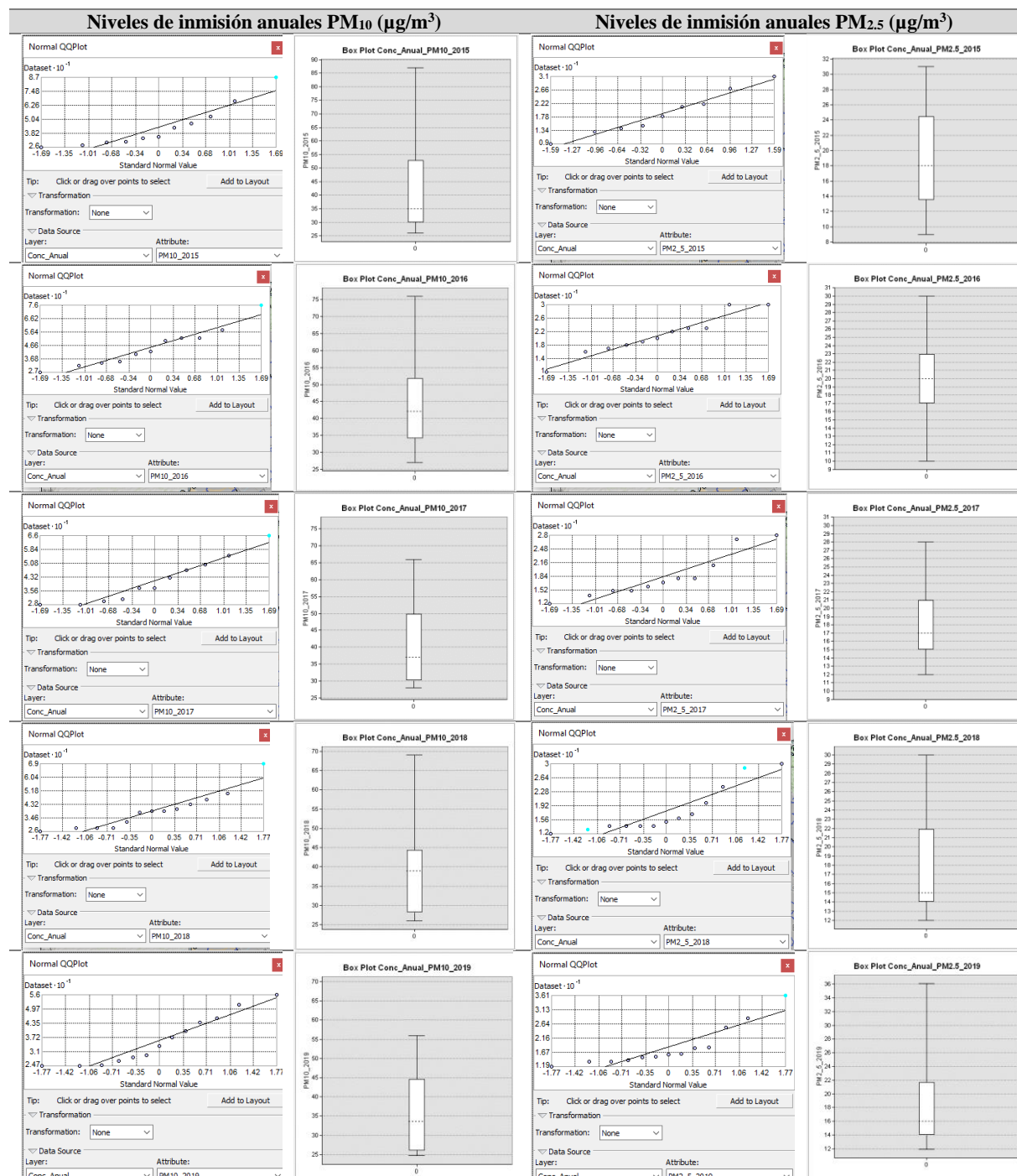


Figura 5.4. Análisis exploratorio de los datos – Gráficos Q-Q Plot y Box Plot. Fuente: Elaboración Autor, 2020.

En la Figura 5.5 se presentan los mapas de Voronoi para cada una de las variables y años evaluados, a partir de los cuales se puede ver de forma muy general los rangos de fluctuación de dichas variables por zonas. Permitiendo corroborar que la zona suroccidente de Bogotá, durante todos los años evaluados refleja mayor afectación asociada tanto a PM₁₀ como a PM_{2.5}. En el sector Suroriente de la ciudad se presentan los menores registros de ambas variables evaluadas. E anterior comportamiento, siendo a su vez un indicio de incidencia direccional o anisotropía de los datos, asociada posiblemente a la predominancia direccional del viento y a otros factores que determinan la dispersión de contaminantes atmosféricos (como por ejemplo la topografía de la ciudad).

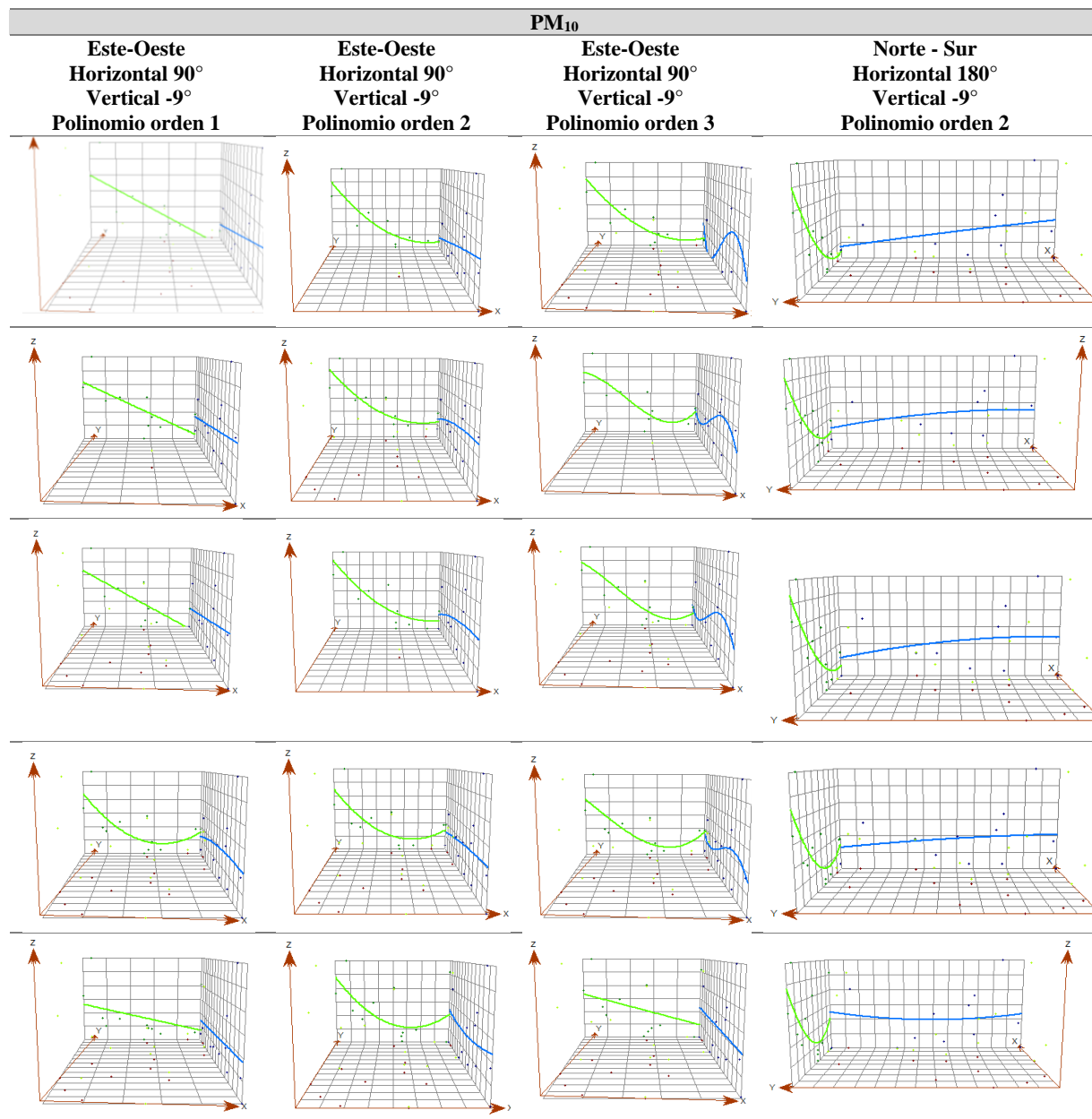


Figura 5.5. Análisis exploratorio de los datos – Mapas de Voronoi. Fuente: Elaboración Autor, 2020.

- **Etapla III: Análisis estructural de los datos**

En la Figura 5.6 se presentan los gráficos de tendencia efectuados partir de las series de datos objeto de estudio, con base en los cuales se puede inferir que los datos tanto de PM₁₀ como de PM_{2.5} obtenidos en la mayoría de los años evaluados señalan indicios de tendencia o de influencia direccional, esto ya que en la vista este-oeste (Horizontal 90°, Vertical -9°), los datos se tienden a ajustar a un polinomio de orden 2. Entre tanto, cabe que en la vista norte-sur (Horizontal 180°, Vertical -9°) no se evidenciaron indicios de tendencia.

Dado lo anterior, cabe anotar que la incidencia direccional es una característica típica de las variables evaluadas, esto ya que la dispersión de los contaminantes atmosféricos está fuertemente determinada por la predominancia direccional del viento, la cual a partir de los análisis de tendencia y de los mapas de Voronoi sugiere que el arrastre de contaminantes en la ciudad es de oriente a occidente, factor de relevante importancia en el ajuste de los modelos de predicción para mejorar la precisión de los mismos.



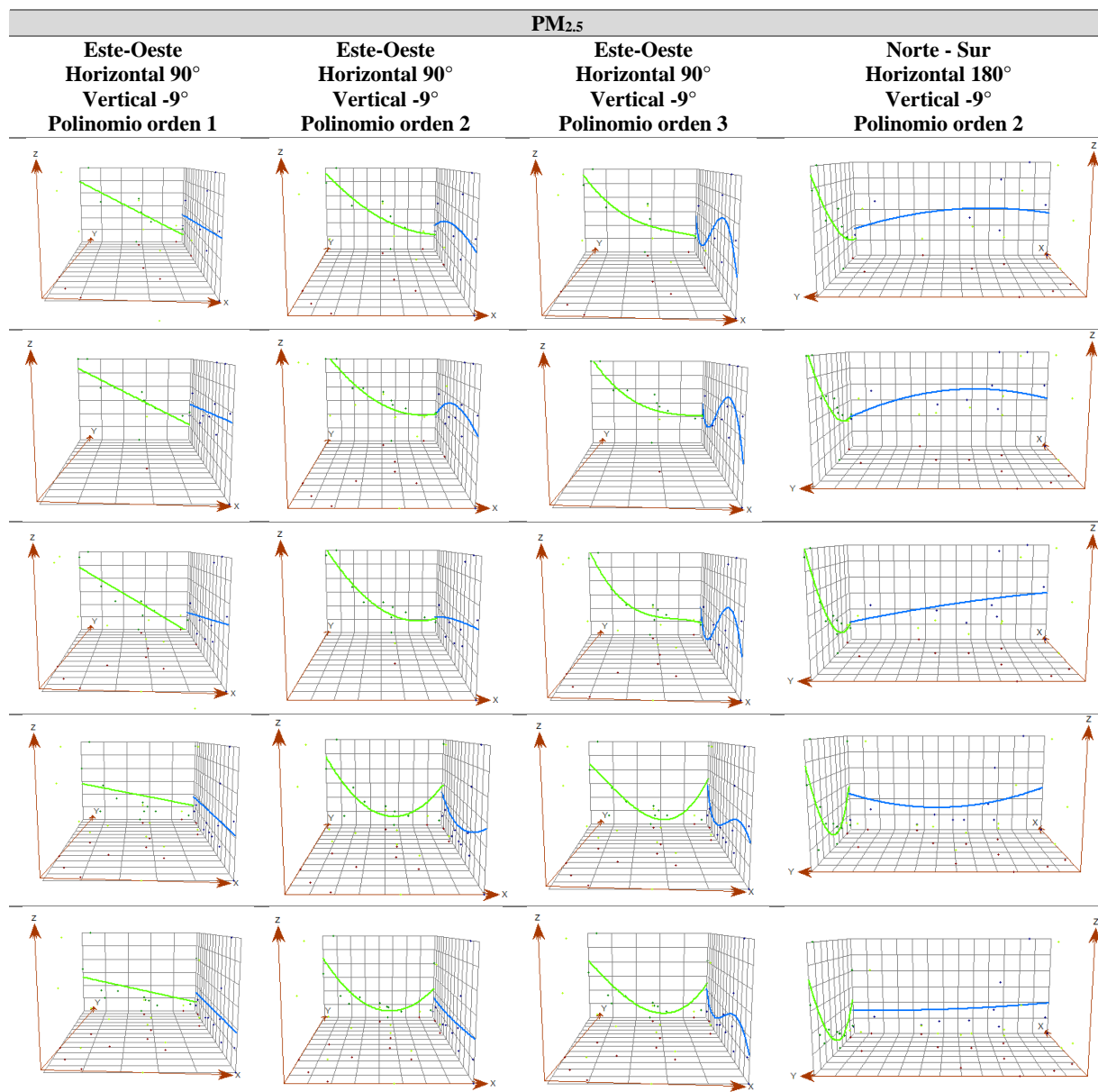
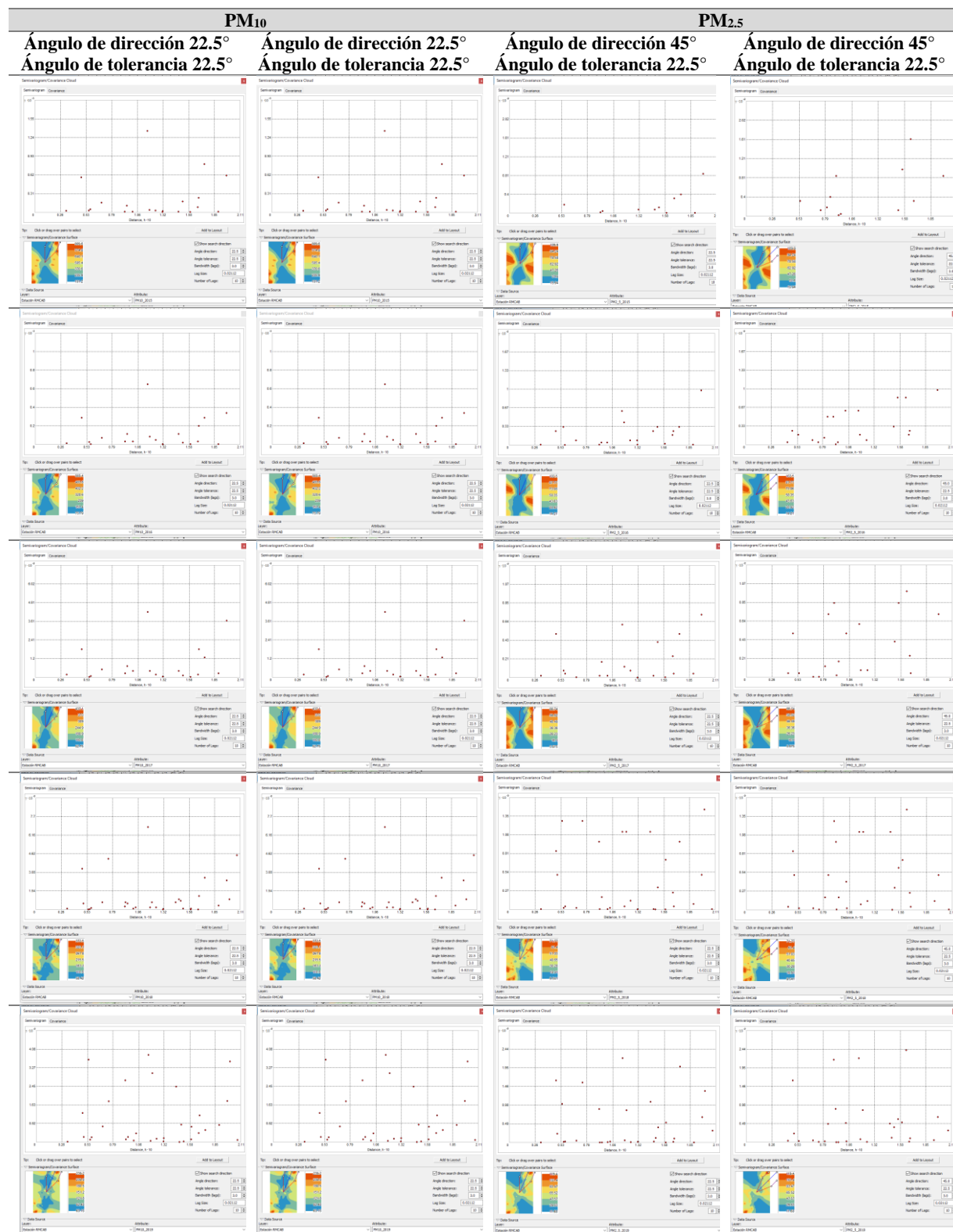


Figura 5.6. Análisis de tendencia – Gráficos de tendencia. Fuente: Elaboración Autor, 2020.

Para complementar el análisis estructural de los datos, se presentan las valoraciones de los semivariogramas (ver Figura 5.7), mediante las cuales igualmente se destacan indicios de anisotropía (presencia de influencia direccional), esto ya que variando las direcciones de vista de los semivariogramas (Ángulo de dirección 22.5° y Ángulo de tolerancia 22.5° y 45°) se logran identificar ciertos cambios en la nube de puntos.



- **Etapas IV: Probatoria de predicción espacial y V: Validación cruzada de métodos**

En la *Tabla 5.3*, se exponen los principales resultados de las etapas de probatoria de predicción espacial y validación cruzada de métodos. Para cada contaminante y año evaluado, se presentan los atributos de los modelos probados para los métodos de interpolación considerados (IDW, Función Base Radial, Kriging Ordinal, Simple y Universal y los respectivos CoKiging). Además, se compendian los errores de predicción obtenidos tras la probatoria de los respectivos métodos de interpolación y conjugación de modelos, sombreándose la combinación del método/modelo que mejoró los resultados, expresados en función de menores errores de predicción, siendo importante mencionar que para la valoración de los errores de predicción y selección del mejor modelo. Se le dio mayor peso y significancia a la reducción del error medio cuadrático (RMS).

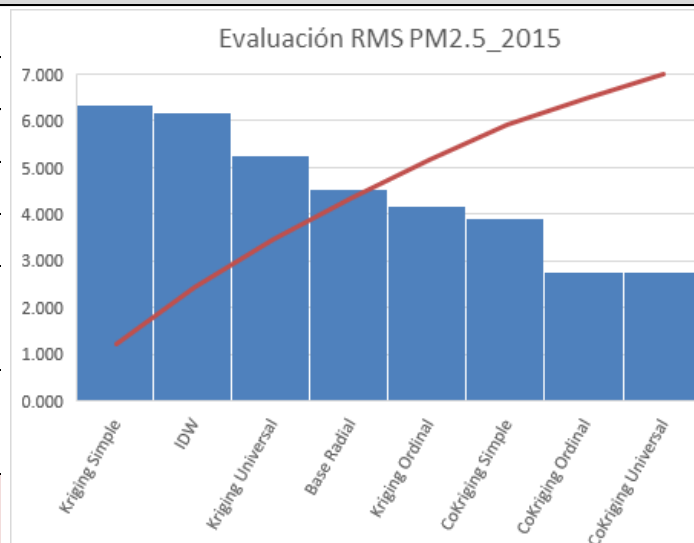
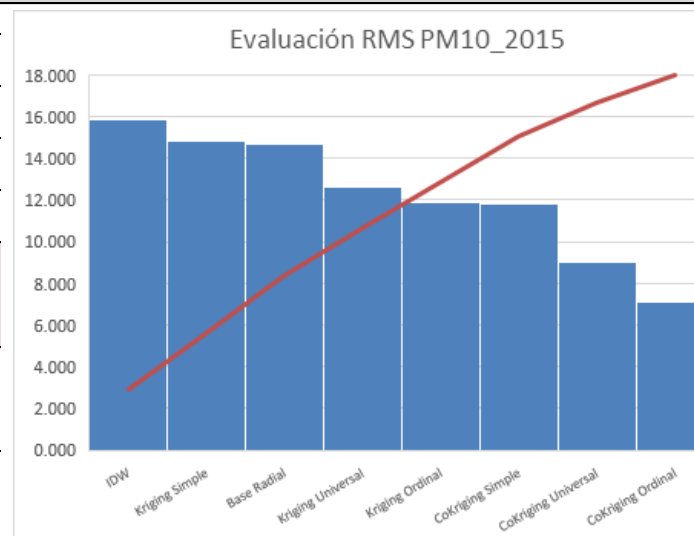
Con base en los resultados obtenidos se resalta la importancia del análisis exploratorio y estructural de los datos, dado que a partir de los ajustes a los modelos, mediante la aplicación de las transformaciones Box Cox y logarítmicas (probadas con anterioridad y expuestas en la *Tabla 5.2*), se logró un mejor ajuste en los modelos de predicción probados, en los cuales al aplicar dichas transformaciones en la mayoría de los casos se evidenciaron descensos en los errores medios cuadráticos (RMS). Asimismo, las conjugaciones aplicadas a los modelos, concernientes a las funciones de presencia de anisotropía, respectivo ajuste de dirección y al modelo de búsqueda de vecinos (elipse), permitieron igualmente en la mayoría de los casos mejorar las predicciones, obteniéndose menores valores de error. Aunque cabe anotar que, dada la naturaleza de ciertos métodos de interpolación, en algunos casos la no asignación de transformaciones y de anisotropía no influyó en mejores resultados de ajuste al modelo.

Adicionalmente, es de resaltar que los métodos de interpolación que representaron de mejor manera el modelado de los datos y con menor margen de error fueron los métodos CoKrigin (simple, ordinal y universal), esto dada la correlación que guardan las dos variables evaluadas, entre tanto, que los métodos menos idóneos fueron los métodos determinísticos (IDW y Función de Base Radial), así como el método Kriging Simple.

Tabla 5.3. Resultados consolidados: Probatoria de predicción espacial y Validación cruzada. Métodos de interpolación y modelos probados, resultados obtenidos para cada método y modelo y análisis de los respectivos errores de predicción asociados.

Método Interpolación		PM10_2015			Análisis del error
		Mejor modelo	RMS	RMSS	ASE
IDW	Power: 1.95, Búsqueda vecinos cercanos: Smooth, Factor Smooth 0.01		15.885		
Base Radial	Kernel función: Completamente regularizada, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Vecinos incluidos: 11, Incluidos al menos: 10, Tipo de sector: 1		14.714		
Kriging Ordinal	Transformación Box-Cox -1.6, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)		11.916	0.773	16.884
Kriging Simple	Transformación Box-Cox -1.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)		14.843	0.815	16.679
Kriging Universal	Transformación Box-Cox -1.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)		12.612	0.662	0.002
CoKriging Ordinal	Parámetro 1: Transformación: Box-Cox -1.3, Búsqueda vecinos cercanos: Smooth, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)		7.124	0.507	14.569
CoKriging Simple	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)		11.838	0.678	17.816
CoKriging Universal	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)		9.033	0.612	16.071

Método Interpolación		PM2.5_2015			Análisis del error
		Mejor modelo	RMS	RMSS	ASE
IDW	Power: 2.17, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Vecinos incluido: 11, Incluidos al menos: 7; Tipo de sector: 1		6.180		
Base Radial	Kernel función: Completamente regularizada, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Vecinos incluidos: 11, Incluidos al menos: 7, Tipo de sector: 1		4.545		
Kriging Ordinal	Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 8, Modelo: Circular optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)		4.168	0.803	5.605
Kriging Simple	Transformación: Box Cox 0.5, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)		6.325	0.956	6.549
Kriging Universal	Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)		5.272	0.018	6.918
CoKriging Ordinal	Parámetro 1: Transformación: Box Cox 0.4, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4 con 45°, Parámetro 2: Transformación: Box Cox -1.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)		2.759	0.548	5.675
CoKriging Simple	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4 con 45°, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)		3.910	0.587	6.659
CoKriging Universal	Parámetro 1: Transformación: Box Cox 0.4, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4 con 45°, Parámetro 2: Transformación: Box Cox -1.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)		2.751	2.915	0.971



		PM10_2016			Análisis del Error
Método Interpolación	Mejor modelo	RMS	RMSS	ASE	
IDW	Power: 1.99, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Vecinos incluidos: 11, Incluidos al menos: 8; Tipo de sector: 1	12.675			<p>Evaluación RMS PM10_2016</p>
Base Radial	Kernel función: Completamente regularizada, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Vecinos incluidos: 11, Incluidos al menos: 6, Tipo de sector: 1	11.873			
Kriging Ordinal	Transformación: Box Cox -0.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4, Modelo: Esdtable optimizado, Anisotropía: No	10.965	0.749	14.346	
Kriging Simple	Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	11.411	0.901	12.770	
Kriging Universal	Transformación: Box Cox -0.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	10.340	0.087	12.340	
CoKriging Ordinal	Parámetro 1: Transformación: Box Cox -0.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Parámetro 2: Transformación: Box Cox 0.9, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Variograma: optimizado - Tipo de modelo: Estable optimizado, Anisotropía: No	8.146	0.675	11.644	
CoKriging Simple	Parámetro 1: Transformación: Box Cox -0.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Parámetro 2: Transformación: Box Cox 1.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	7.217	0.554	13.230	
CoKriging Universal	Parámetro 1: Transformación: Box Cox -0.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Parámetro 2: Transformación: Box Cox 0.9, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	8.594	0.069	13.333	
		PM2.5_2016			Análisis del error
Método Interpolación	Mejor modelo	RMS	RMSS	ASE	
IDW	Power: 3.07, Búsqueda vecinos cercanos: Smooth, Factor Smooth: 0.2	4.815			<p>Evaluación RMS PM2.5_2016</p>
Base Radial	Kernel función: Completamente regularizada, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Vecinos incluidos: 11, Incluidos al menos: 10, Tipo de sector: 1	2.498			
Kriging Ordinal	Transformación: Box Cox 1.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	3.568	0.727	4.716	
Kriging Simple	Transformación: Box Cox 1.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 8, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	4.489	0.027	0.858	
Kriging Universal	Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	3.317	0.062	4.320	
CoKriging Ordinal	Parámetro 1: Transformación: Box Cox 1.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4 con 45°, Parámetro 2: Transformación: Box Cox -0.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	2.285	0.530	4.222	
CoKriging Simple	Parámetro 1: Transformación: Box Cox 1.3, Búsqueda vecinos cercanos: Smooth, Parámetro 2: Transformación: Box Cox -0.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	2.780	0.544	5.055	
CoKriging Universal	Parámetro 1: Transformación: Box Cox 0.9, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Parámetro 2: Transformación: Box Cox -0.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	2.340	0.799	2.830	

Universidad Militar Nueva Granada. Wendi Garzón. Estudio multitemporal de los niveles de inmisión de material particulado (PM2.5 y PM10) en las ciclorutas de Bogotá D.C, Colombia.

Método Interpolación		PM10_2017			
	Mejor modelo	RMS	RMSS	ASE	Análisis del Error
IDW	Power: 1.94, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Vecinos incluidos: 11, Incluidos al menos: 10; Tipo de sector: 4	11.254			<p>Evaluación RMS PM10_2017</p>
Base Radial	Kernel función: Completamente regularizada, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Vecinos incluidos: 11, Incluidos al menos: 8, Tipo de sector: 8	10.092			
Kriging Ordinal	Transformación: Box Cox -1.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 8, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	8.862	0.816	10.295	
Kriging Simple	Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	9.979	0.018	11.169	
Kriging Universal	Transformación: Box Cox -1.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	9.072	0.002	4.571	
CoKriging Ordinal	Parámetro 1: Transformación: Box Cox -1.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Parámetro 2: Transformación: Box Cox -1.2, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: No	7.880	0.769	9.654	
CoKriging Simple	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 8, Parámetro 2: Transformación: Box Cox -0.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	5.977	0.005	9.661	
CoKriging Universal	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4, Parámetro 2: Transformación: NO, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: No	7.387	0.683	10.778	
Método Interpolación		PM2.5_2017			
	Mejor modelo	RMS	RMSS	ASE	Análisis del Error
IDW	Power: 3.07, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Vecinos incluidos: 11, Incluidos al menos: 10; Tipo de sector: 1	3.735			<p>Evaluación RMS PM2.5_2017</p>
Base Radial	Kernel función: Completamente regularizada, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Vecinos incluidos: 11, Incluidos al menos: 8, Tipo de sector: 1	2.072			
Kriging Ordinal	Transformación: Box Cox -0.6, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	2.311	0.054	3.670	
Kriging Simple	Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	3.455	0.772	4.229	
Kriging Universal	Transformación: Box Cox -0.6, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	2.240	0.032	7.818	
CoKriging Ordinal	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	2.016	0.021	3.748	
CoKriging Simple	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	2.138	0.556	3.788	
CoKriging Universal	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	2.082	0.030	3.699	

Universidad Militar Nueva Granada. Wendi Garzón. Estudio multitemporal de los niveles de inmisión de material particulado (PM2.5 y PM10) en las ciclorutas de Bogotá D.C, Colombia.

Método Interpolación		PM10_2018			Análisis del Error
Mejor modelo		RMS	RMSS	ASE	
IDW	Power: 1.68, Búsqueda vecinos cercanos: Smooth, Factor Smooth: 0.2	11.117			<p>Evaluación RMS PM10_2018</p>
Base Radial	Kernel función: Completamente regularizada, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Vecinos incluidos: 11, Incluidos al menos: 8, Tipo de sector: 4	10.589			
Kriging Ordinal	Transformación: Box Cox -1, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 8, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: No	9.684	0.850	11.074	
Kriging Simple	Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 8, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	10.112	0.957	10.678	
Kriging Universal	Transformación: Box Cox -1, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 8, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	9.982	0.006	15.804	
CoKriging Ordinal	Parámetro 1: Transformación: Box Cox -1, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4, Parámetro 2: Transformación: Box Cox -1.5, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	7.745	0.784	9.942	
CoKriging Simple	Parámetro 1: Transformación: Box Cox -1, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 8, Parámetro 2: Transformación: Box Cox -1.5, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: No	8.109	0.720	10.726	
CoKriging Universal	Parámetro 1: Transformación: Box Cox -1, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Parámetro 2: Transformación: Box Cox -1.5, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: No	8.092	0.006	12.840	
Método Interpolación		PM2.5_2018			Análisis del Error
Mejor modelo		RMS	RMSS	ASE	
IDW	Power: 1.08, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Vecinos incluidos: 11, Incluidos al menos: 10, Tipo de sector: 8	6.297			<p>Evaluación RMS PM2.5_2018</p>
Base Radial	Kernel función: Completamente regularizada, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Vecinos incluidos: 11, Incluidos al menos: 8, Tipo de sector: 4	6.193			
Kriging Ordinal	Transformación: Box Cox -1.5, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 8, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: No	5.963	1.308	5.185	
Kriging Simple	Transformación: Box Cox -1.5, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si (Elipse)	5.768	1.148	5.069	
Kriging Universal	Transformación: Box Cox -1.5, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 8, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: No	6.094	0.004	1.621	
CoKriging Ordinal	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: No	4.547	0.871	5.126	
CoKriging Simple	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: No	4.646	0.779	5.972	
CoKriging Universal	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: No	4.547	0.871	5.126	

		PM10_2019			Análisis del error
Método Interpolación	Mejor modelo	RMS	RMSS	ASE	
IDW	Power: 2, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Vecinos incluidos: 13, Incluidos al menos: 10; Tipo de sector: 8	12.517			
Base Radial	Kernel función: Completamente regularizada, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Vecinos incluidos: 13, Incluidos al menos: 10, Tipo de sector: 1	11.950			
Kriging Ordinal	Transformación: Box Cox 0.4, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Modelo: Esferico optimizado, Anisotropía: No	10.953	1.023	10.934	
Kriging Simple	Transformación: Box Cox 0.4, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Modelo: Polinomial optimizado, Anisotropía: No	10.305	1.023	10.076	
Kriging Universal	Transformación: Box Cox 0.4, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Modelo: Polinomial optimizado, Anisotropía: No	10.906	8.726	1.249	
CoKriging Ordinal	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 1 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: No	5.815	0.680	8.509	
CoKriging Simple	Parámetro 1: Transformación: Box Cox 0.4, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 1, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: No	4.328	1.125	4.055	
CoKriging Universal	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 1, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: No	5.815	0.680	8.509	
		PM2.5_2019			Análisis del Error
Método Interpolación	Mejor modelo	RMS	RMSS	ASE	
IDW	Power: 2, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Vecinos incluidos: 13, Incluidos al menos: 10; Tipo de sector: 8	7.893			
Base Radial	Kernel función: Completamente regularizada, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Vecinos incluidos: 13, Incluidos al menos: 10, Tipo de sector: 1	7.369			
Kriging Ordinal	Transformación: Box Cox -1.2, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: No	6.924	1.213	6.431	
Kriging Simple	Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Esférico optimizado, Anisotropía: No	6.649	1.185	5.854	
Kriging Universal	Transformación: Box Cox -1.2, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Modelo: Exponencial optimizado, Anisotropía: No	7.007	0.757	0.009	
CoKriging Ordinal	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 8, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 8, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: No	3.756	0.684	5.487	
CoKriging Simple	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4, con 45°, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: No	2.974	1.043	2.545	
CoKriging Universal	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4 con 45°, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Gaussiano optimizado, Anisotropía: No	3.662	0.660	5.545	

Fuente: Elaboración Autor, 2020.

- **Etapla VI: Predicción espacial final**

Mediante el método de interpolación y la conjugación del mejor modelo seleccionado anteriormente, se predijeron los valores de PM10 y PM2.5 en puntos estratégicos (situado en el perímetro del área urbana de la ciudad) que garantizan el cubrimiento de la totalidad del área de estudio. A continuación, en la Tabla 5.4 se presenta los resultados obtenidos de dicha etapa de predicción espacial.

Tabla 5.4. Predicción de los niveles de inmisión anuales de material particulado PM10 y PM2.5, Años 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019.

Punto	Coordenadas Planas ⁹		Niveles de inmisión anuales PM ₁₀ (µg/m ³)					Niveles de inmisión anuales PM _{2.5} (µg/m ³)				
	Este	Norte	2015	2016	2017	2018	2019	2015	2016	2017	2018	2019
Suba_Predicted	1003717	1025854	36.1	40.1	37.8	35.1	36.2	16.2	17.4	16.6	17.9	17.3
Santa Fe_Predicted	1008157	998209	36.0	41.8	37.1	35.0	34.6	16.0	15.4	17.3	15.6	16.6
Bosa_Predicted	984411	1003076	50.9	48.2	45.4	41.1	37.3	21.7	26.6	20.4	20.9	18.8
Ciudad Bolívar_Predicted	990845	987040	44.6	45.1	56.2	38.2	36.5	19.6	21.4	19.0	21.3	17.8
Usme_Predicted	999279	986376	39.3	41.4	39.5	36.1	35.1	17.6	18.0	17.5	18.9	17.3

Fuente: Elaboración Autor, 2020.

Dado la ampliación del área de estudio y de puntos, fue necesario repetir las etapas IV (Probatoria de predicción espacial) y V (Validación Cruzada), de tal manera que el método utilizado para las predicciones finales represente las mejores características e idoneidad. Así las cosas, a continuación, en la Tabla 5.5 se presentan los resultados del desarrollo de la etapa de predicción final.

Tabla 5.5. Resultados consolidados: Predicción final

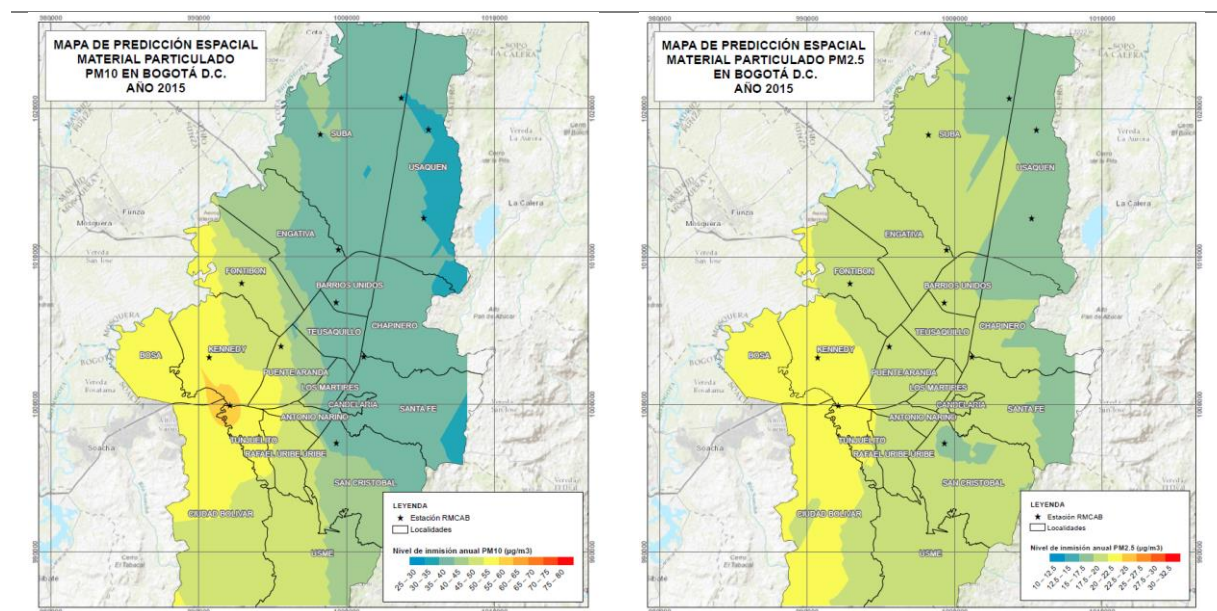
Método Interpolación	Mejor modelo definitivo	RMS	RMSS	ASE
PM10 2015				
CoKriging Ordinal	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si, (Elipse)	7.080	0.603	12.291
PM2.5 2015				
CoKriging Universal	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si, (Elipse)	2.226	0.553	4.094
PM10 2016				
CoKriging Simple	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si, (Elipse)	5.823	0.379	7.932
PM2.5 2016				
CoKriging Simple	Parámetro 1: Transformación: Box Cox 1.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4 con 45°, Parámetro 2: Transformación: Box Cox 0.3, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si, (Elipse)	2.127	0.025	3.953

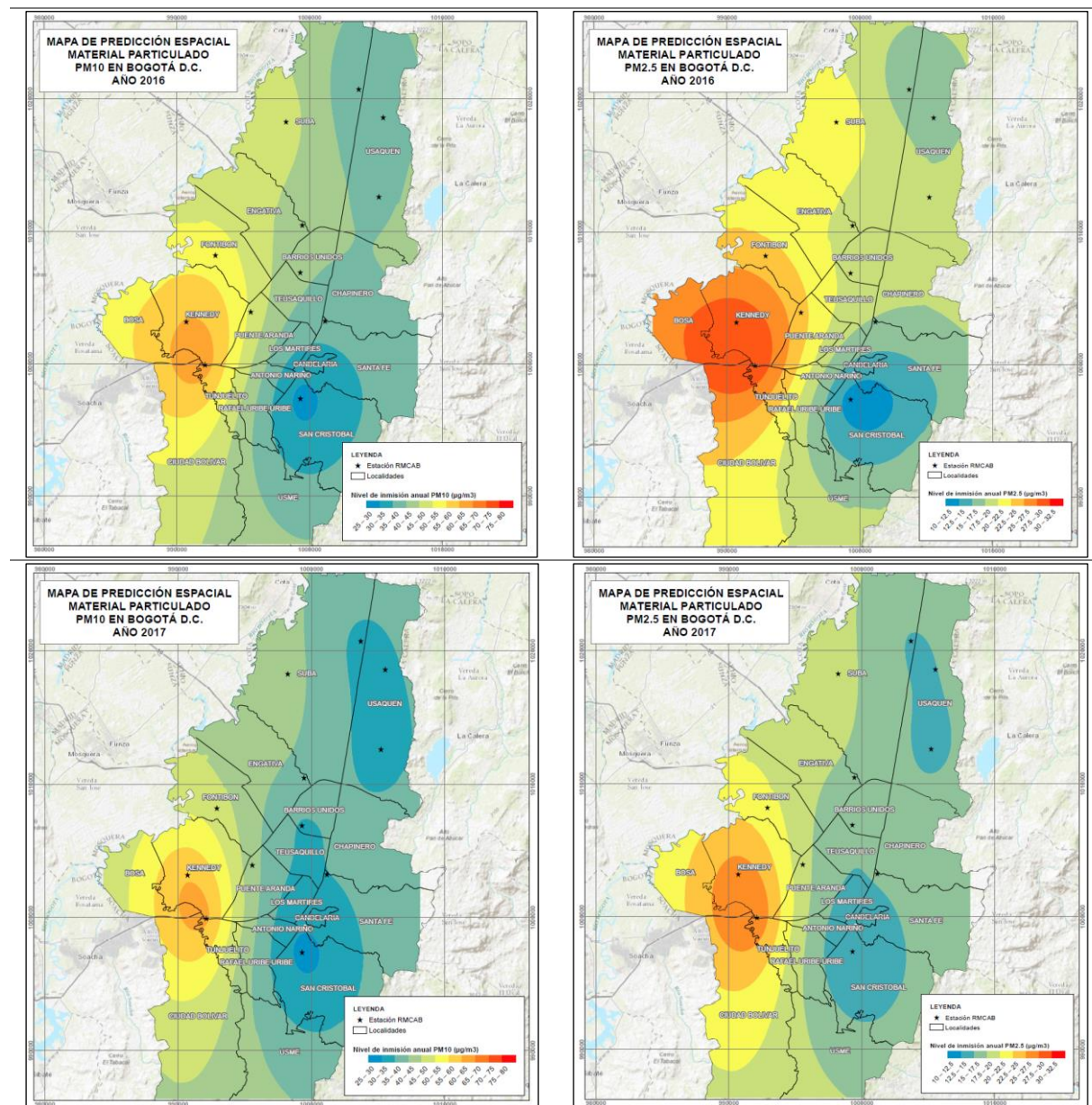
⁹ Sistema de coordenadas: MAGNA Colombia Bogotá, Proyección: Transversal Mercator, Datum: MAGNA (3116).

<i>Método Interpolación</i>	<i>Mejor modelo definitivo</i>	<i>RMS</i>	<i>RMSS</i>	<i>ASE</i>
PM10_2017				
CoKriging Simple	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si, (Elipse)	5.551	0.778	7.317
PM2.5_2017				
CoKriging Simple	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: Si, (Elipse)	1.781	0.720	2.484
PM10_2018				
CoKriging Simple	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 8, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: No	6.950	0.868	7.737
PM2.5_2018				
CoKriging Simple	Parámetro 1: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: No	3.909	0.890	4.473
PM10_2019				
CoKriging Simple	Parámetro 1: Transformación: Box Cox 0.4, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 1, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: No	3.713	1.195	3.269
PM2.5_2019				
CoKriging Universal	Parámetro 1: Transformación: Box Cox 0.4, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4, Parámetro 2: Transformación: No, Búsqueda vecinos cercanos: Estándar, Tipo de sector: 4 con 45°, Modelo: Estable optimizado, Anisotropía: No	2.384	0.944	2.142

Fuente: Elaboración Autor, 2020.

En la Figura 5.8 se presentan los mapas de predicción espacial de Material Particulado PM10 y PM2.5 para los años 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019. En el Anexo A se presentan dichos mapas de predicción detallados.





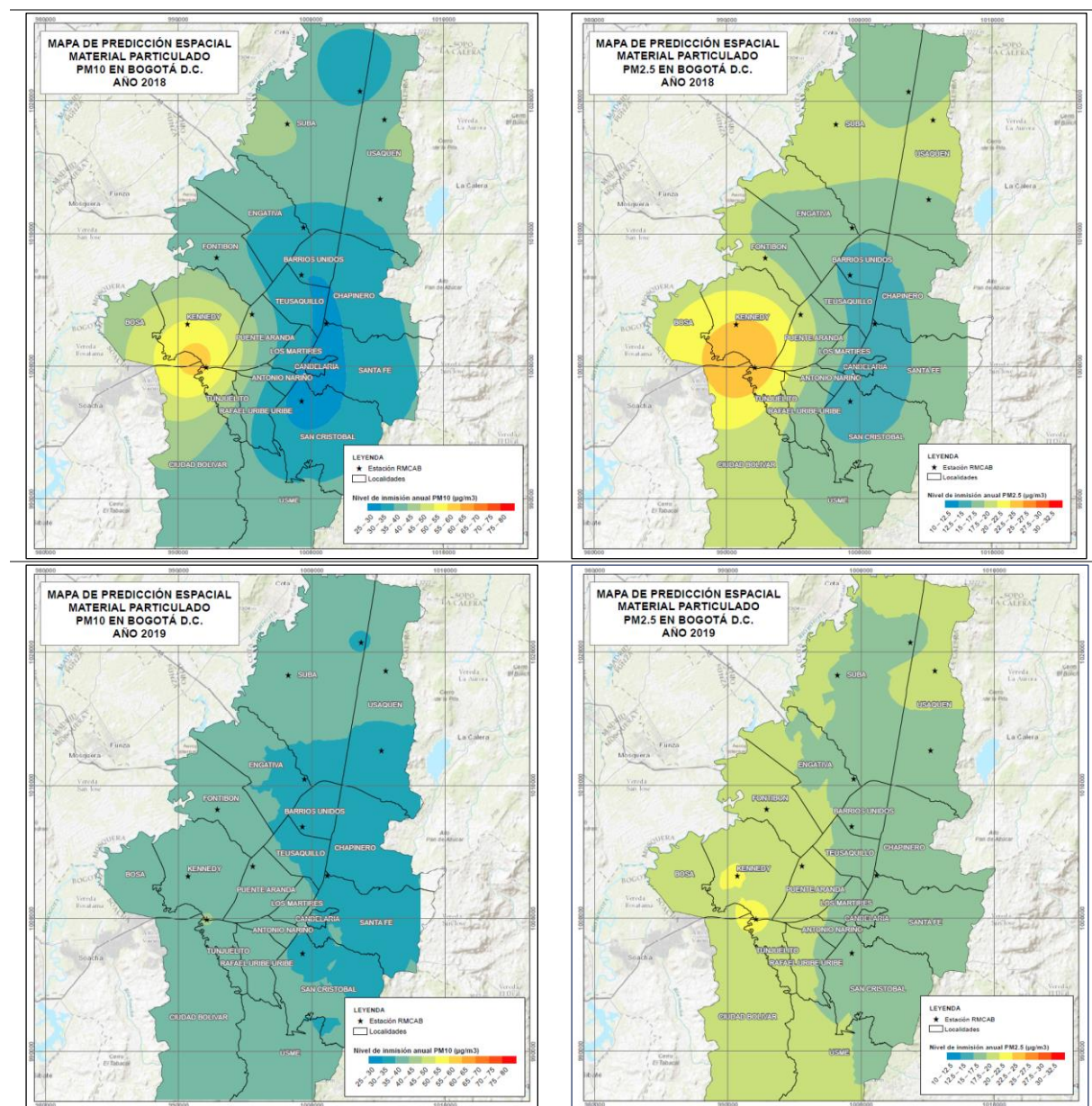


Figura 5.8. Mapas de predicción espacial de Material Particulado PM10 y PM2.5 en Bogotá, para los años 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019. Fuente: Elaboración Autor, 2020.

- Etapa VII: Asociación a las ciclorrutas

En la Tabla 5.6 se expone la propuesta desarrollada para la categorización de los datos obtenidos, sustentadas las guías y objetivos intermedios de la Organización Mundial de la Salud.

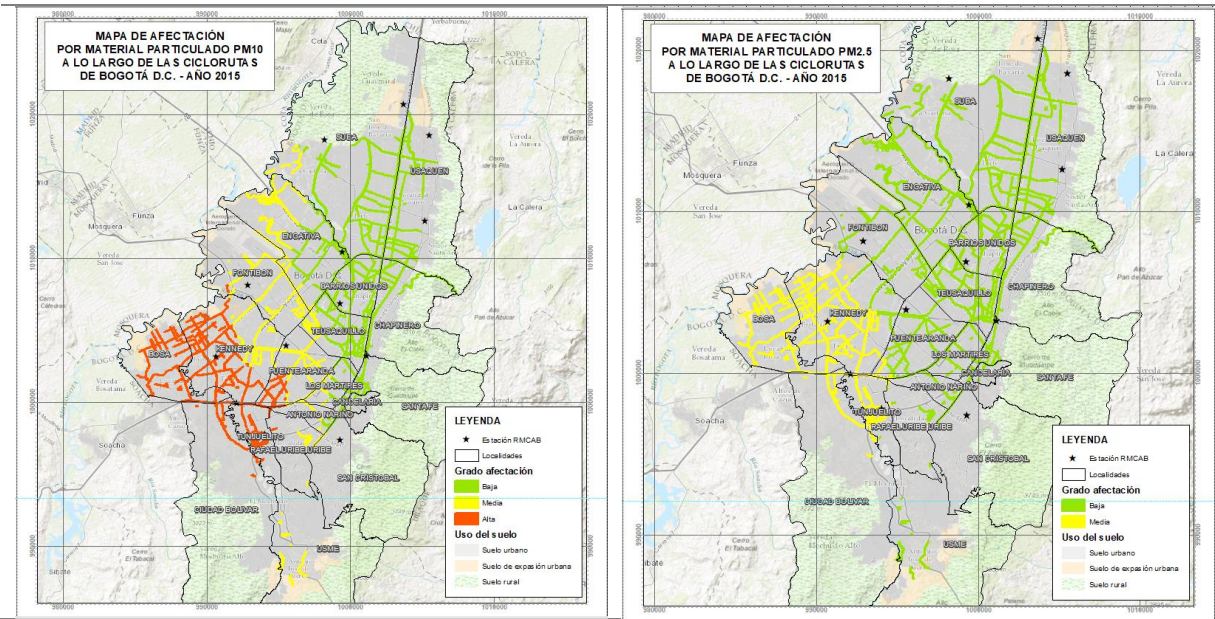
Tabla 5.6. Propuesta calificación del grado de afectación asociada a los niveles de inmisión anuales de material particulado PM10 y PM2.5.

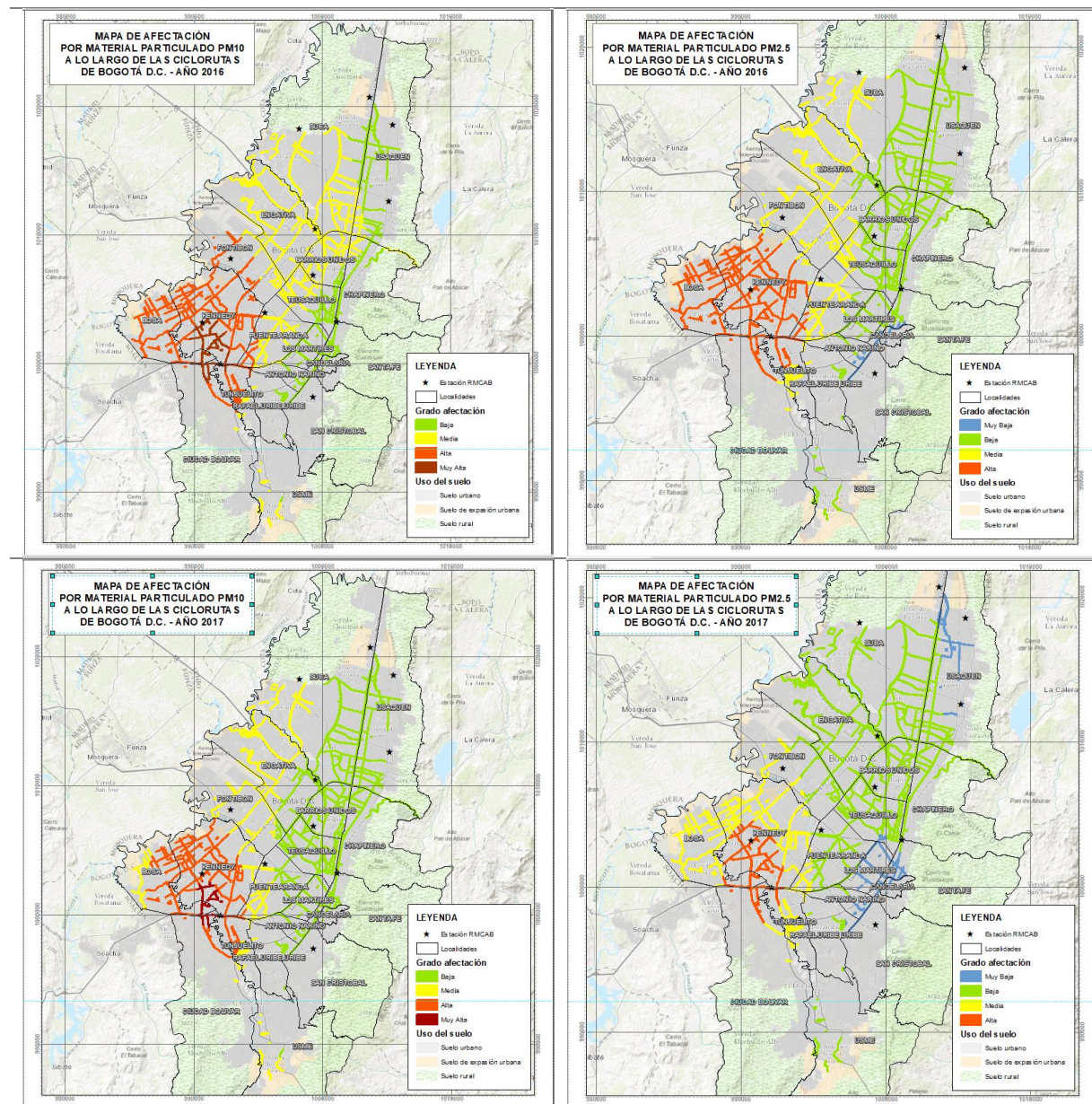
PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	Grado de afectación		Fundamento del nivel elegido (Organización Mundial de la Salud, 2005)
20	10	1	Muy Baja	Estos son los niveles más bajos con los cuales se ha demostrado, con más del 95% de confianza, que la mortalidad total, cardiopulmonar y por cáncer de pulmón, aumenta en respuesta a la exposición prolongada al material particulado
30	15	2	Baja	Estos niveles reducen el riesgo de mortalidad en un 6% [2-11%] aproximadamente en comparación con el nivel del OI-2.
40	20	3	Media	
50*	25*	4	Alta	Estos niveles reducen el riesgo de mortalidad prematura en un 6% aproximadamente [2- 11%] en comparación con el nivel del OI-1.
>60	>30	5	Muy Alta	Estos niveles están asociados con un riesgo de mortalidad a largo plazo alrededor de un 15% mayor que con el nivel de las GCA.

* Niveles de inmisión que coinciden con el límite máximo permisible establecido por la normatividad nacional (Resolución 2254 del 2017). Fuente: (Organización Mundial de la Salud, 2005). Elaboración Autor, 2020.

Dicha categorización se asignó a la red de ciclorutas del Distrito, obteniéndose como resultados los Mapas multitemporales del estado de afectación por material particulado PM10 y PM2.5 a lo largo de las ciclorutas de Bogotá D.C. que se presentan en la Figura 5.9. En el Anexo B, se pueden ver al detalle dichos mapas.

- **Productos cartográficos: Mapas multitemporales del estado de afectación por material particulado PM10 y PM2.5 a lo largo de las ciclorutas de Bogotá D.C**





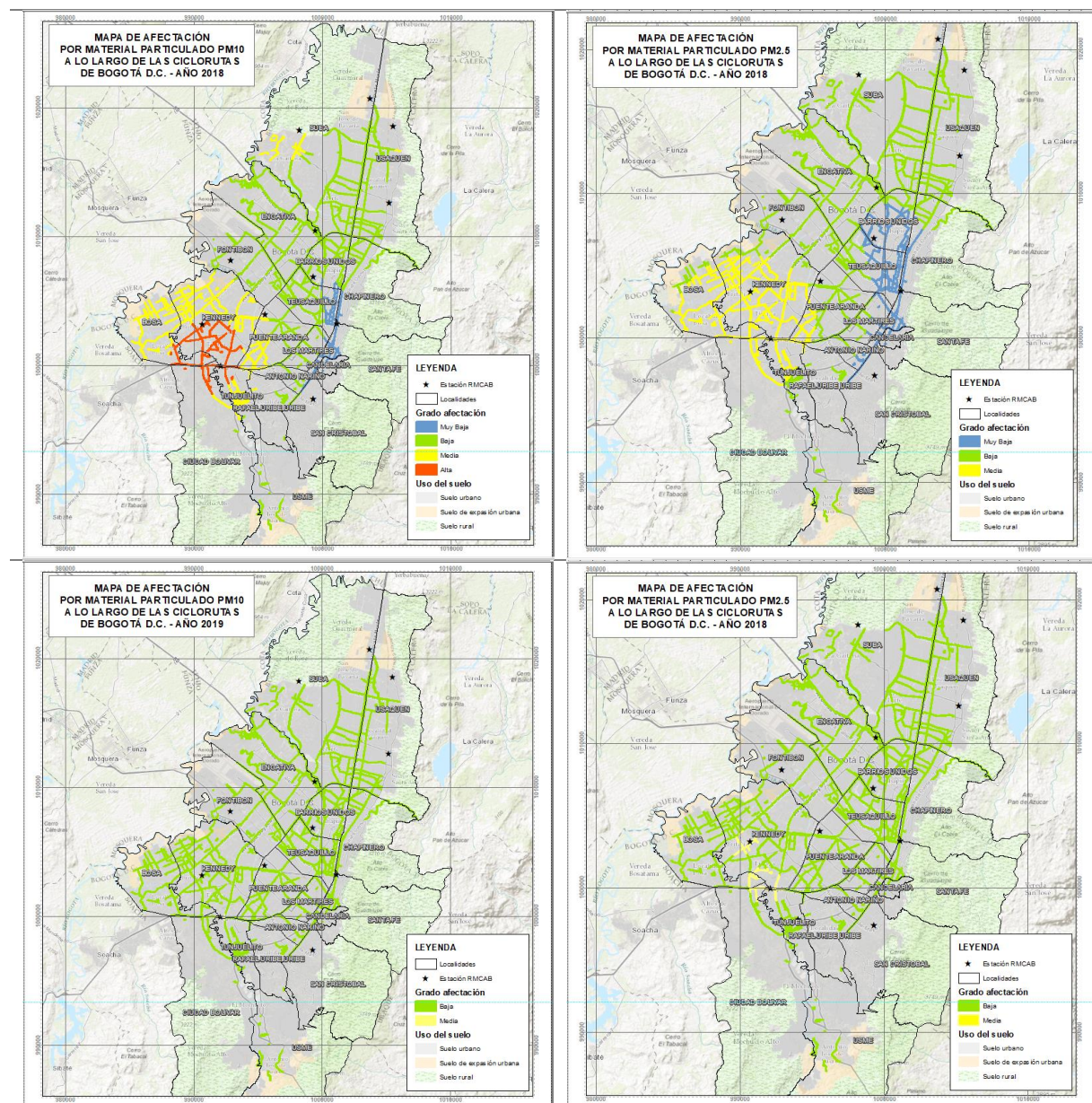


Figura 5.9. Mapas de afectación por Material Particulado PM10 y PM2.5 a lo largo de las ciclorutas de Bogotá, para los años 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019. Fuente: Elaboración Autor, 2020.

En la Tabla 5.7, para los años de estudio se relacionan los kilómetros de ciclorutas de acuerdo con su respectivo grado de afectación por PM10 y PM2.5. Así mismo, se exponen los correspondientes porcentajes que representan.

Tabla 5.7. Comparativo multitemporal del grado de afectación asociado a los niveles de inmisión anuales de material particulado PM10 y PM2.5.

Grado de afectación		PM10									
		2015		2016		2017		2018		2019	
		Km cicloruta	%	Km cicloruta	%	Km cicloruta	%	Km cicloruta	%	Km cicloruta	%
1	Muy Baja	--	--	--	--	--	--	35	7	--	--
2	Baja	264	49	128	24	278	52	324	61	534	99.7
3	Media	134	25	246	46	138	26	130	24	2	0.3
4	Alta	138	26	133	25	104	19	45	9	--	--
5	Muy Alta	--	--	29	5	16	3	--	--	--	--
		PM2.5									
1	Muy Baja	--	--	11	2	51	9	83	15	--	--
2	Baja	396	74	241	45	323	60	325	61	520	97
3	Media	139	26	150	28	117	22	127	24	16	3
4	Alta	--	--	134	25	45	8	--	--	--	--
5	Muy Alta	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Fuente: Elaboración Autor, 2020.

A partir del análisis de los mapas de predicción y de los datos consolidados presentados en la Tabla 5.7, se puede decir que el material particulado menor a 10 micras registró su mayor grado de afectación para el año 2016, esto ya que alcanzó la categoría de afectación “muy alta” en el 5% de las ciclorutas. Asimismo, registró la categoría de afectación “alta” en el 25% de las ciclorutas, en este sentido, es pertinente mencionar que estas dos categorías refieren niveles de inmisión que están asociados a riesgos a la salud humana. Además, refieren concentraciones que superan los estándares establecidos por las Guías de Calidad el Aire de la Organización Mundial de la Salud y el referente normativo anual establecido en la legislación nacional (Resolución 2254 de 2017).

En segunda instancia, el año de mayor afectación asociada a niveles de inmisión de PM10 corresponde al 2017, esto ya que igualmente se alcanzan categorías de afectación “muy alta” y “alta”, respectivamente en el 3% y 19% de las ciclorutas del Distrito; entre tanto que durante el año 2018 las categorías de afectación registradas evidencian una mejoría, pues no se identificaron tramos de ciclorruta con la clasificación “muy alta”, aunque se presenta la categoría “alta” en el 9% de los bicirruiles, y empiezan a tomar más peso las categorías “bajas” y “medias”. De hecho, cabe anotar que este es el único año en el que se registró la categoría “muy baja”, presentándose en el 7% de estas vías. Entre tanto, para el año 2019, los resultados son positivos esto ya que en casi en la totalidad de las ciclorutas (99,7%) se registra un estado de afectación bajo, asociado a niveles de inmisión que no superan el objetivo intermedio 2 de la OMS ni el actual referente normativo estandarizado para un periodo de exposición anual (50 µg/m³).

Con respecto a la fracción PM2.5 del material particulado cabe anotar que para ningún periodo de referencia anual evaluado se registra la categoría “muy alta”, aunque se alcanza la categoría “alta” durante los años 2016 y 2017. Entre tanto que para el último periodo anual evaluado (2019), se registra un comportamiento muy similar al del PM10, esto ya que casi toda la extensión de las ciclorutas (97%) señala un calificativo de afectación “bajo”; siendo un factor favorable tanto para la salud de los ciclistas que se ven expuestos a estos niveles de fondo; así como, para el fortalecimiento de este medio de movilidad urbana sostenible.

VI. CONCLUSIONES

El desarrollo del presente estudio arrojó resultados idóneos en las representaciones cartográficas, permitiendo evaluar satisfactoriamente y de manera multitemporal los niveles de inmisión de material particulado PM10 y PM2.5 a lo largo de las ciclovías el Distrito Capital.

A partir de la probatoria de predicción espacial se identificó que los métodos de interpolación que representan un mejor modelo de predicción de los datos corresponden a los métodos determinísticos CoKriging, esto dada la correlación que guardan ambas variables evaluadas, mientras que, por lo contrario, los métodos no determinísticos probados (IDW y RBF) por lo general desmejoran el modelo de predicción espacial.

La propuesta de categorización empleada para asignar el grado de afectación por material particulado PM10 y PM2.5 a las ciclorutas del Distrito, sustentada por las guías y objetivos intermedios de la Organización Mundial de la Salud, se ajustó adecuadamente a los datos, esto dado el tema principal del presente estudio en relación con la salud pública.

El mapeo de la afectación asociada a estos contaminantes atmosféricos permitió identificar que durante los años 2016 y 2017 ambos contaminantes alcanzaron los mayores grados de afectación, particularmente el PM10 alcanzó una categoría “muy alta” en cerca del 4% de las ciclorutas, coincidiendo con el sector suroccidental de la capital, por su parte, el PM2.5 alcanzó una clasificación “alta” en el 25% (2016) y 8% (2017) de estas vías, coincidiendo igualmente con la zona Suroccidental, asociada a niveles de inmisión que representan efectos adversos sobre la salud humana y por ende el sobrepaso tanto de los valores Guía de Calidad del Aire establecidos por la OMS como de los límites permisibles nacionales.

Entre tanto, que los resultados obtenidos para el año 2019 son bastante alentadores, esto ya que para ambos contaminantes en casi la totalidad de la red de ciclorutas se reporta un grado de afectación “bajo”, siendo un factor favorable en las condiciones ambientales a las cuales se ven expuestos los ciclistas, lo que a su vez resulta positivo para el fortalecimiento de la bicicleta como una alternativa de trasporte sostenible en la capital bogotana.

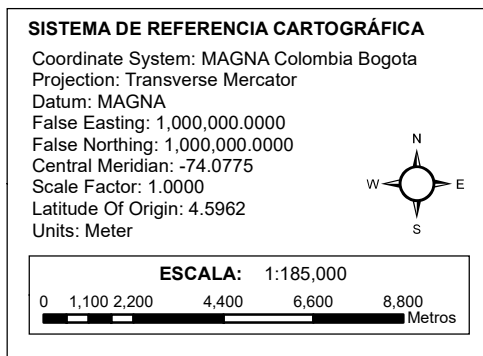
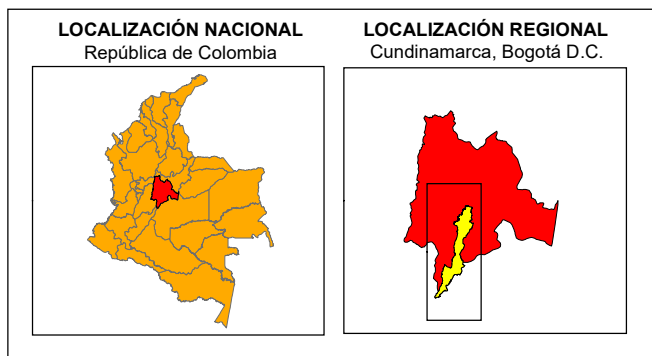
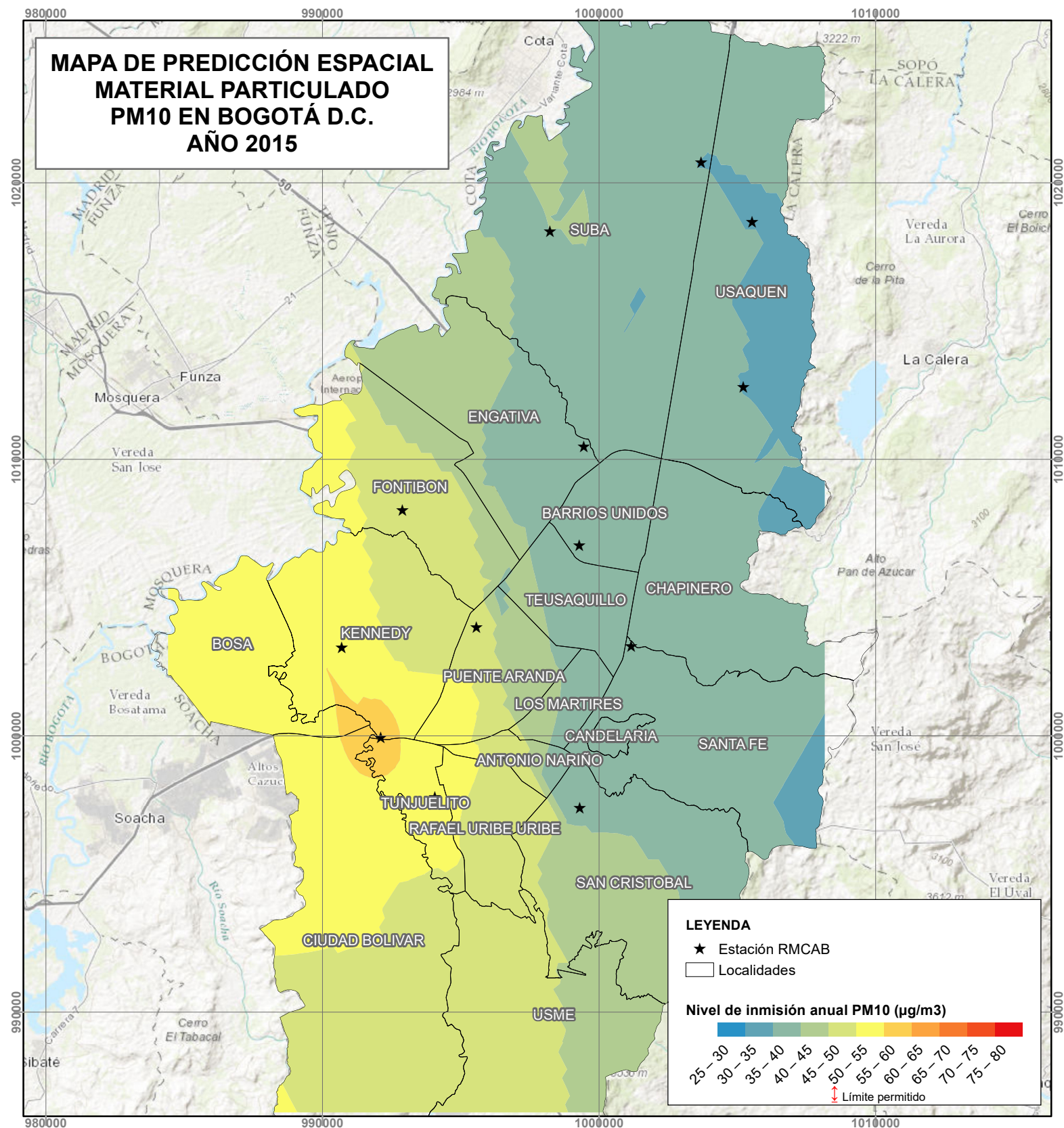
REFERENCIAS

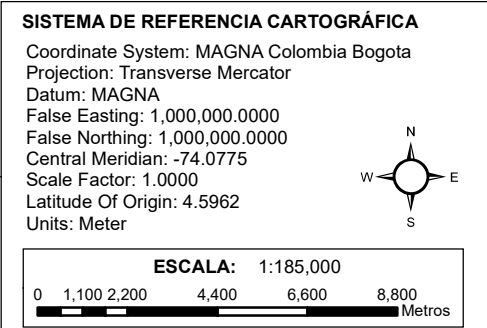
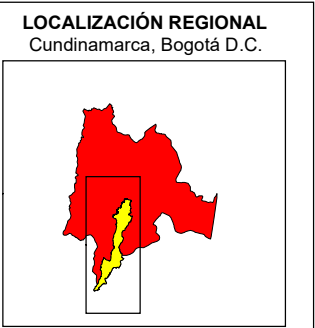
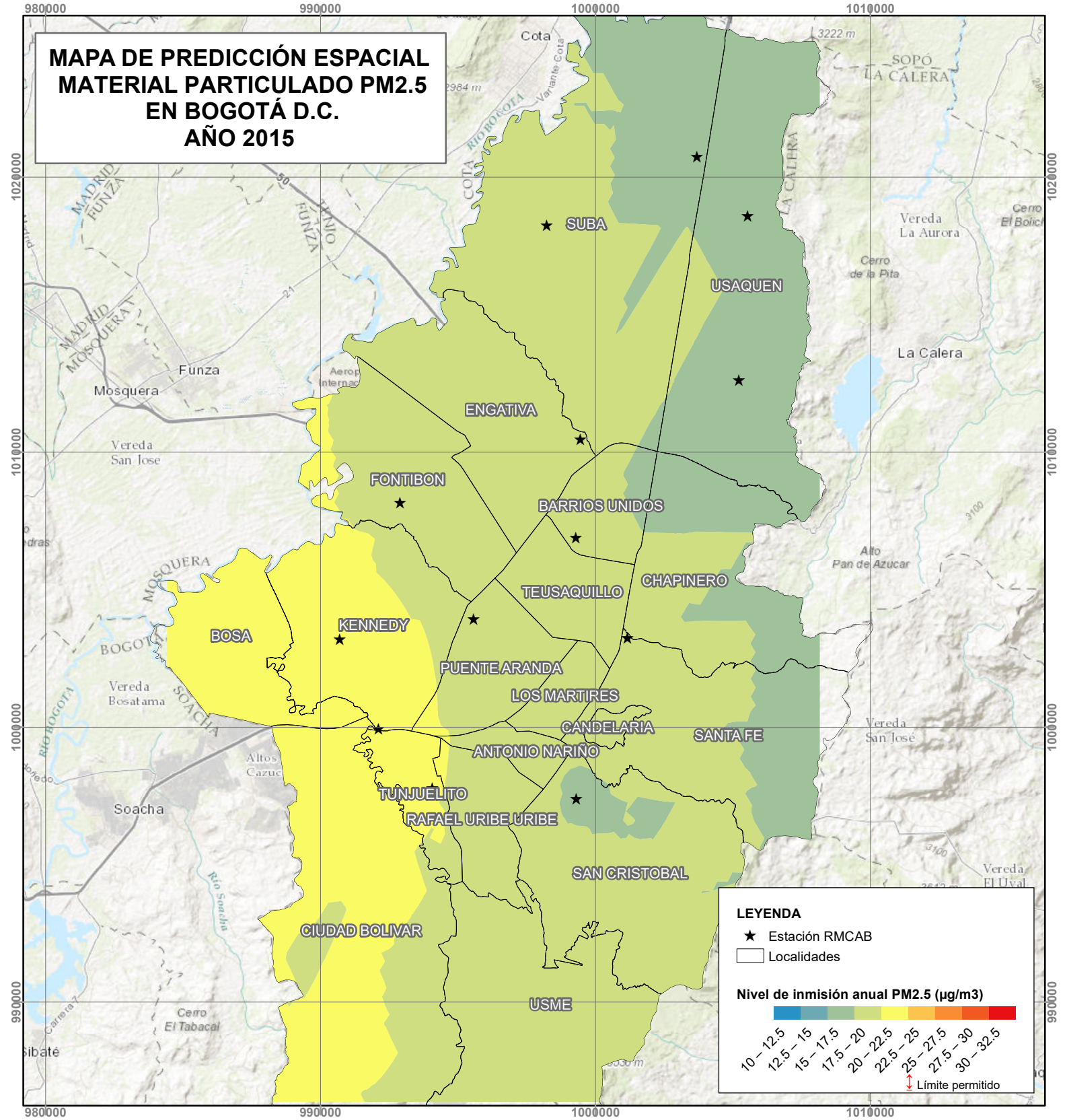
- Unidad Administrativa Especial de Catastro, IDECA, Secretaría de Movilidad. (04 de 11 de 2020). *Ciclorruta de Bogotá*. Obtenido de <https://ideca.gov.co/recursos/mapas/ciclorruta-de-bogota>
- Alcaldía de Bogotá. (21 de 11 de 2017). *Ubicación de la Ciudad*. Obtenido de <https://bogota.gov.co/ubicacion-de-bogota-sitios-turisticos-vias-y-alrededores-de-bogota>
- Alcaldía de Bogotá. (10 de 07 de 2019). *4 iniciativas para mejorar la calidad del aire desde la Secretaría de Movilidad*. Obtenido de <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/iniciativas-ambientales-de-movilidad-en-la-alcaldia-penalosa>
- Boada, R. A. (2020). Geoestadística - Resumen - Especialización Geomática. Bogotá.
- Boada, R. A. (2020). Métodos no determinísticos: Kriging. Adaptación del libro Análisis exploratorio de datos espaciales Capítulo 10. Bogotá.
- Desktop, E. -A. (2016). *ArcMap - Realización de validación cruzada y validación*. Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.4/extensions/geostatistical-analyst/performing-cross-validation-and-validation.htm>
- ESRI - ArcGIS Desktop. (2016). *ARCMAP - Métodos determinísticos para la interpolación espacial*. Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.4/extensions/geostatistical-analyst/deterministic-methods-for-spatial-interpolation.htm>
- ESRI - ArcGIS Desktop. (2016). *ArcMap - Cómo funciona la interpolación ponderada de distancia inversa*. Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.4/extensions/geostatistical-analyst/how-inverse-distance-weighted-interpolation-works.htm>

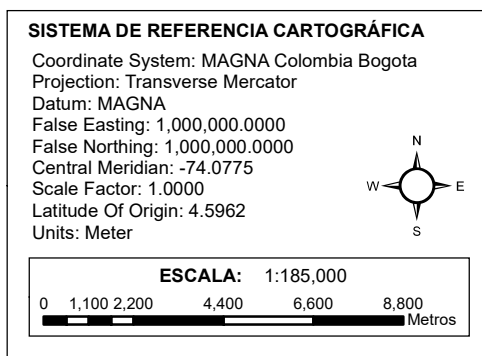
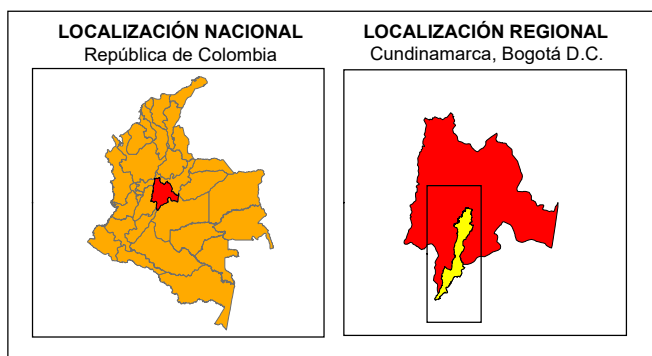
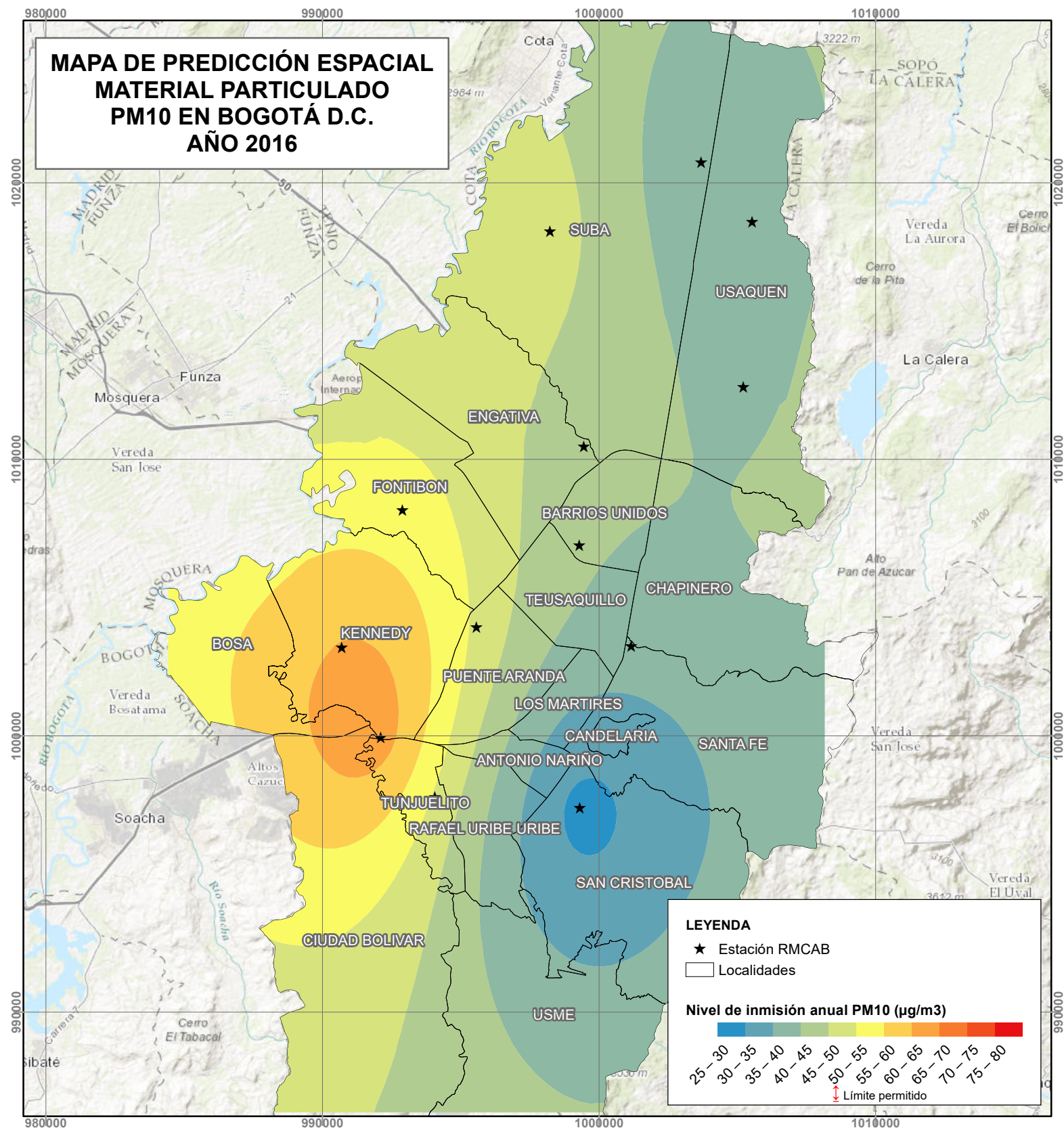
- ESRI - ArcGIS Desktop. (2016). *ArcMap - Kriging en Geostatistical Analyst*. Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.4/extensions/geostatistical-analyst/kriging-in-geostatistical-analyst.htm>
- ESRI - ArcGIS Desktop. (2016). *ArcMap - Uso de las funciones de base radial*. Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.4/extensions/geostatistical-analyst/how-radial-basis-functions-work.htm#GUID-624E6450-BB23-4955-94EF-2750C543558E>
- Franz, E. b. (25 de 04 de 2018). *Geoestadística, interpolación con Kriging*. Obtenido de <https://acolita.com/geoestadistica-interpolacion-con-kriging/>
- Instituto Distrital de Recreación y Deporte. (26 de Abril de 2020). *Bogotá alcanza los 80 kilómetros de ciclovías temporales*. Obtenido de <https://www.idrd.gov.co/noticias/bogota-alcanza-los-80-kilometros-ciclovias-temporales#:~:text=Estos%20corredores%20refuerzan%20los%20550,infraestructura%20para%20circula ci%C3%B3n%20de%20ciclistas>
- IQAir. (2019). *2019 Word Air Quality Report, Region & City PM2.5 Ranking*.
- JavierMCriado, J.-W. (2020). *Series temporales, Estacionariedad*. Obtenido de <http://analisisdedatos.net/analisis/ST/estacionariedad.php>
- JF. Franco, J. S. (2016). Air Pollution alongside Bike-Paths in Bogotá-Colombia. *Frontiers in Environmental Science*, 4:77.
- José Ospina Valencia (er). (05 de 06 de 2019). *Las capitales y países de América Latina más contaminados*. Obtenido de <https://www.dw.com/es/las-capitales-y-pa%C3%ADses-de-am%C3%A9rica-latina-m%C3%A1s-contaminados/a-48768155>
- Laumbach, R. J. (2010). Outdoor Air Pollutants and Patient Health. *American Family Physician*, 175-180.
- Lopez Jimeno, C. e. (1991). *Tipos de semivariogramas*.
- Michael Brauer, C. L. (2008). A cohort study of traffic-related air pollution impacts on birth outcomes. *Environ Health Perspect*, 680-686.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Resolución 2254 del 2017 “Por la cual se adopta la norma de calidad el aire ambiente y se dictan otras disposiciones”*. Bogotá D.C, Colombia.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (Octubre de 2010). Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire. *Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire*. Bogotá, Colombia.
- Organización Mundial de la Salud. (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Ginebra, Suiza.
- Secretaría de Movilidad de Bogotá. (6 de 2 de 2019). *Mapa Ciclorutas Urbano*. Obtenido de <https://www.movilidadbogota.gov.co/web/sites/default/files/Paginas/2019-02-06/Mapa%20ciclorrutas%20urbano.pdf>
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2017). *Documento Técnico de Soporte, Modificación del Decreto 98 de 2011*. Bogotá DC., Colombia.
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2019). *Informe Anual de la Calidad del Aire, Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá*. Bogotá D.C, Colombia.
- Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá. (2013). *Estaciones RMCAB*. Obtenido de Características generales de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá y parámetros medidos: <http://ambientebogota.gov.co/estaciones-rmcab>
- Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá. (2015). *Informe Anual de la Calidad del Aire, Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá*. Bogotá D.C.
- Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá. (2016). *Informe Anual de la Calidad del Aire, Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá*. Bogotá.
- Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá. (2017). *Informe Anual de la Calidad del Aire, Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá*. Bogotá.
- Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá. (2018). *Informe Anual de la Calidad del Aire, Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá*. Bogotá.
- Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá. (10 de 09 de 2020). *Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá RMCAB*. Obtenido de Publicaciones - Informes Anuales: <http://201.245.192.252:81/home/text/1512>
- Secretaría Distrital de Movilidad. (16 de 12 de 2019). *Encuesta Movilidad 2019 - Resultados Preliminares*. Obtenido de https://www.movilidadbogota.gov.co/web/sites/default/files/Paginas/22-04-2020/20191216_presentacion_encuesta_v2.pdf
- Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá. (2013). *Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá - RMCAB*. Obtenido de <http://ambientebogota.gov.co/web/sda/estaciones-rmcab>

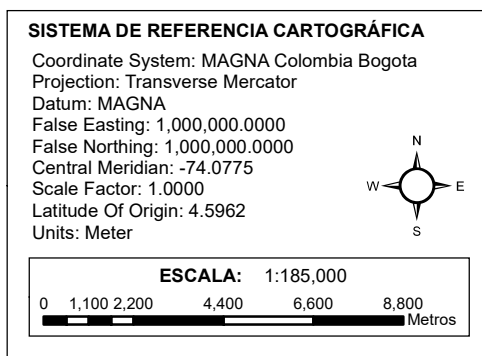
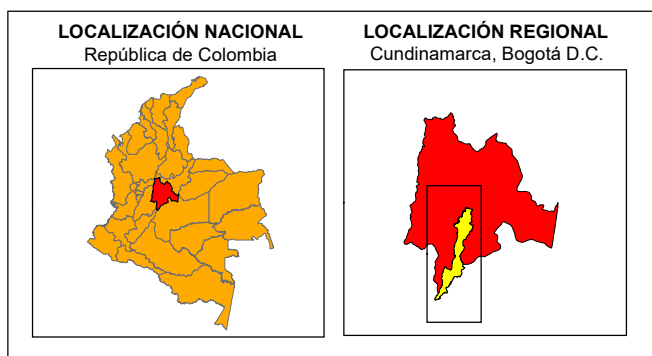
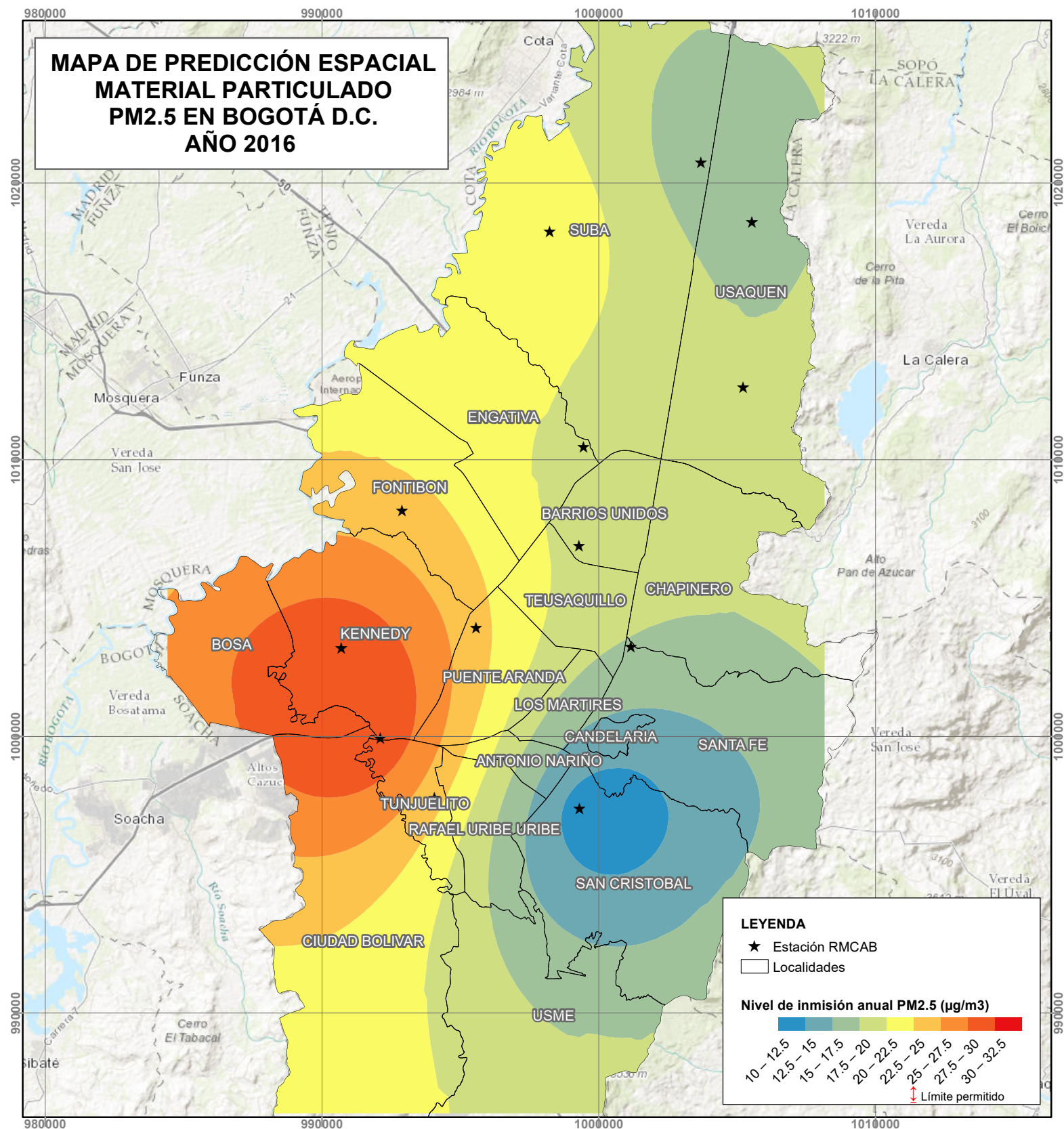
- Stefanie Ebel Sarnat, B. A. (2006). Factors Affecting the Association between Ambient Concentrations and Personal Exposures to Particles and Gases. *Environmental Health Perspectives*, 649-654.
- Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital. (2020). *Infraestructura de Datos Espaciales de Bogotá*. Obtenido de <https://www.ideca.gov.co/>
- United States Environmental Protection Agency. (19 de January de 2017). *Particulate Matter (PM) Basics*. Obtenido de <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- W James Gauderman, E. A. (2004). The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 years of age. *The New England journal of medicine*, 1057-1067.
- Wedgid. (s.f.). *Estadística descriptiva*. Obtenido de https://www.uv.es/webgid/Descriptiva/23_valores_faltantes.html
- World Health Organization. (25 de 3 de 2014). *7 million premature deaths annually linked to air pollution*. Obtenido de <https://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/>
- World Health Organization. (27 de 09 de 2016). *WHO releases country estimates on air pollution exposure and health impact*. Obtenido de <https://www.who.int/news/item/27-09-2016-who-releases-country-estimates-on-air-pollution-exposure-and-health-impact>

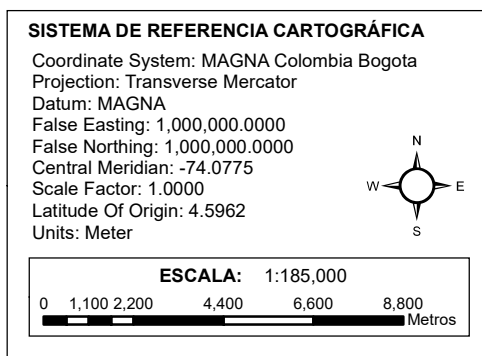
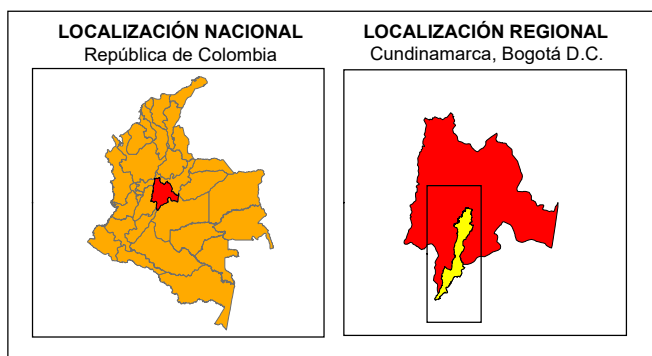
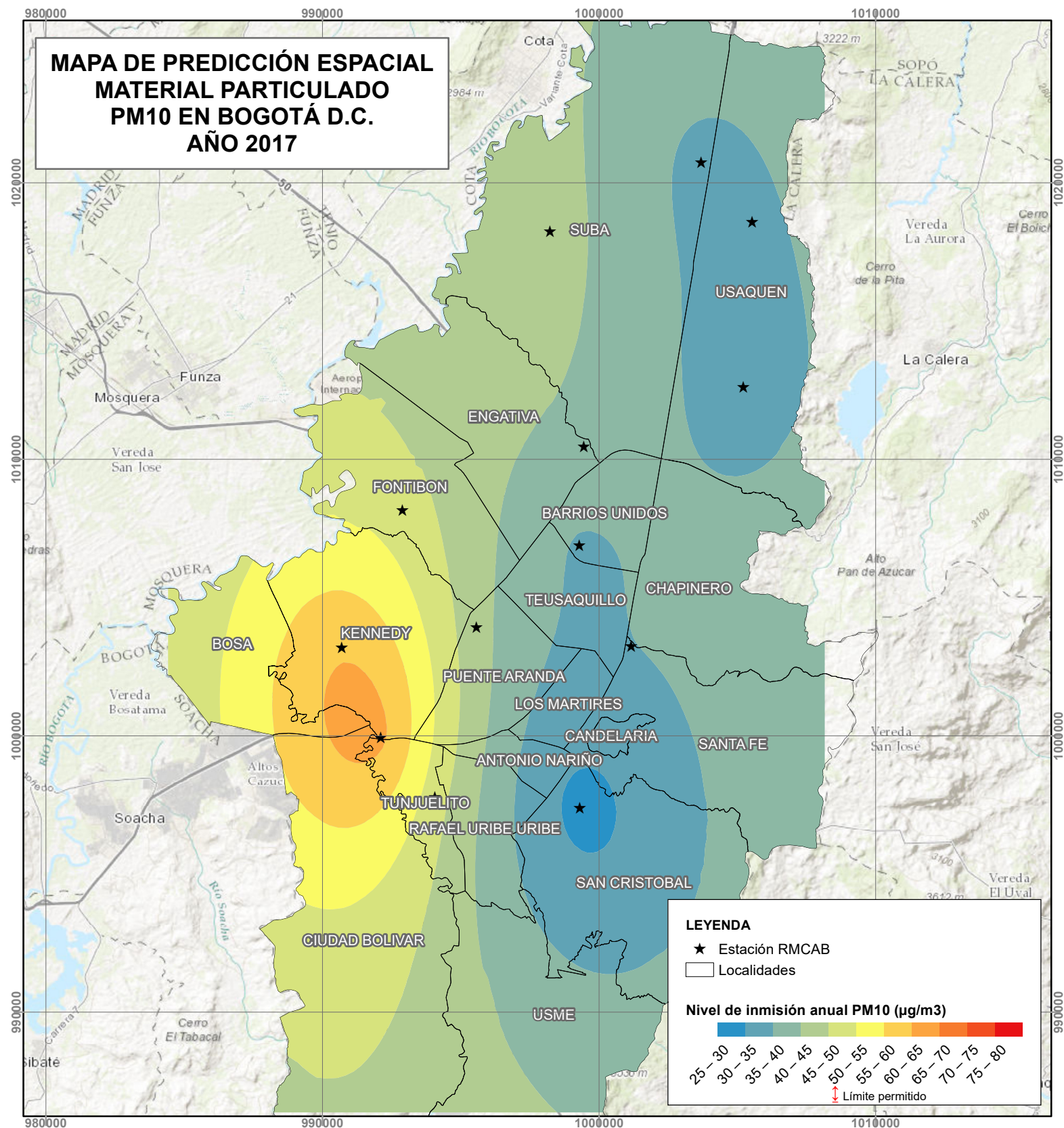
ANEXO A. MAPAS DE PREDICCIÓN ESPACIAL DE MATERIAL PARTICULADO PM10 Y PM2.5 EN BOGOTÁ, PARA LOS AÑOS 2015, 2016, 2017, 2018 Y 2019

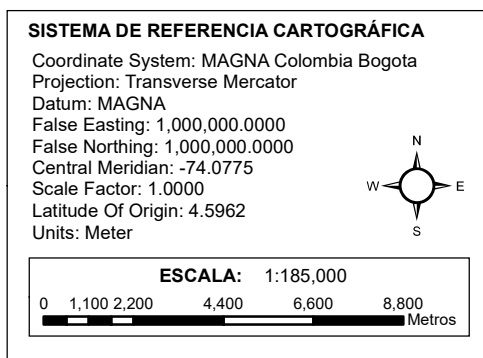
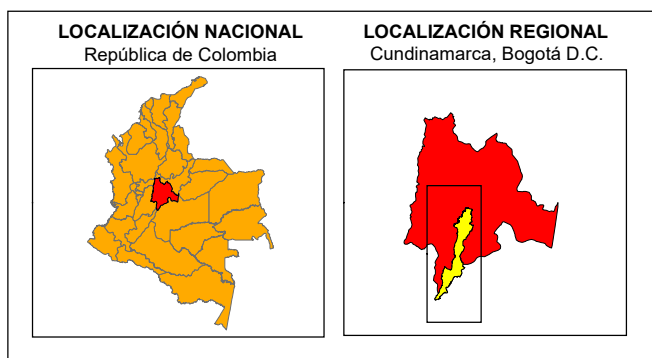
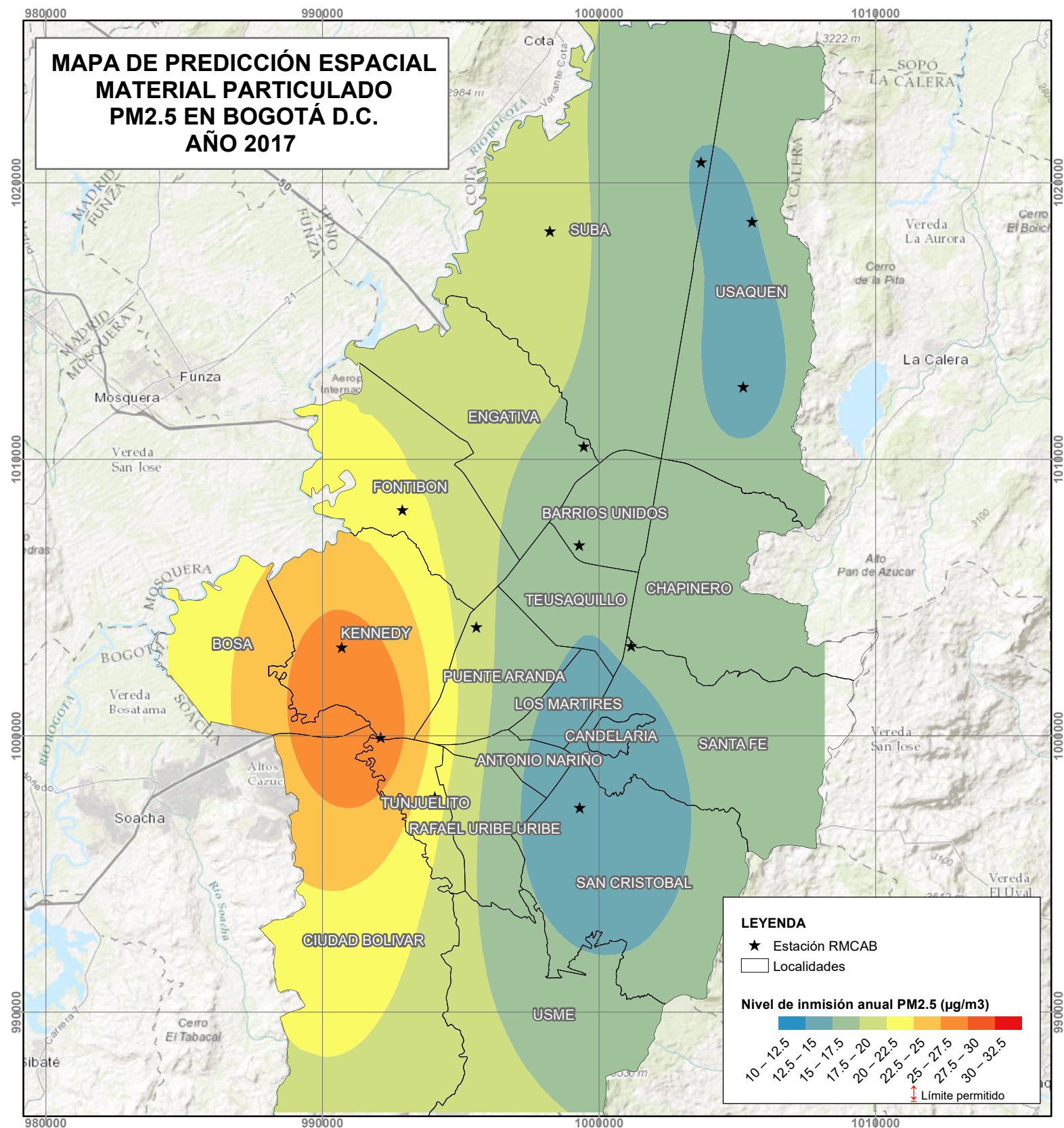


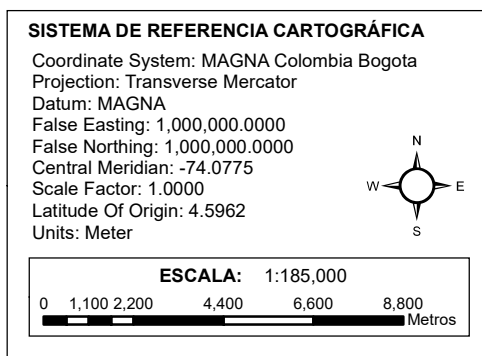
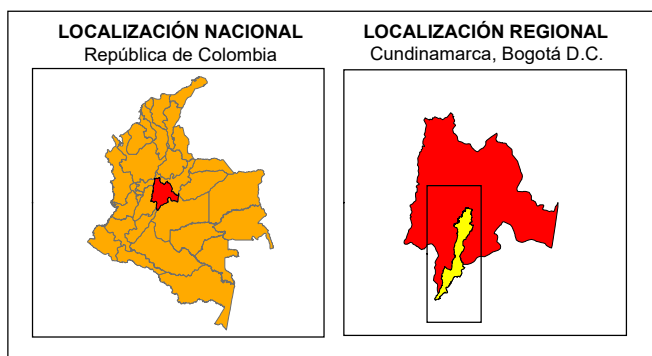
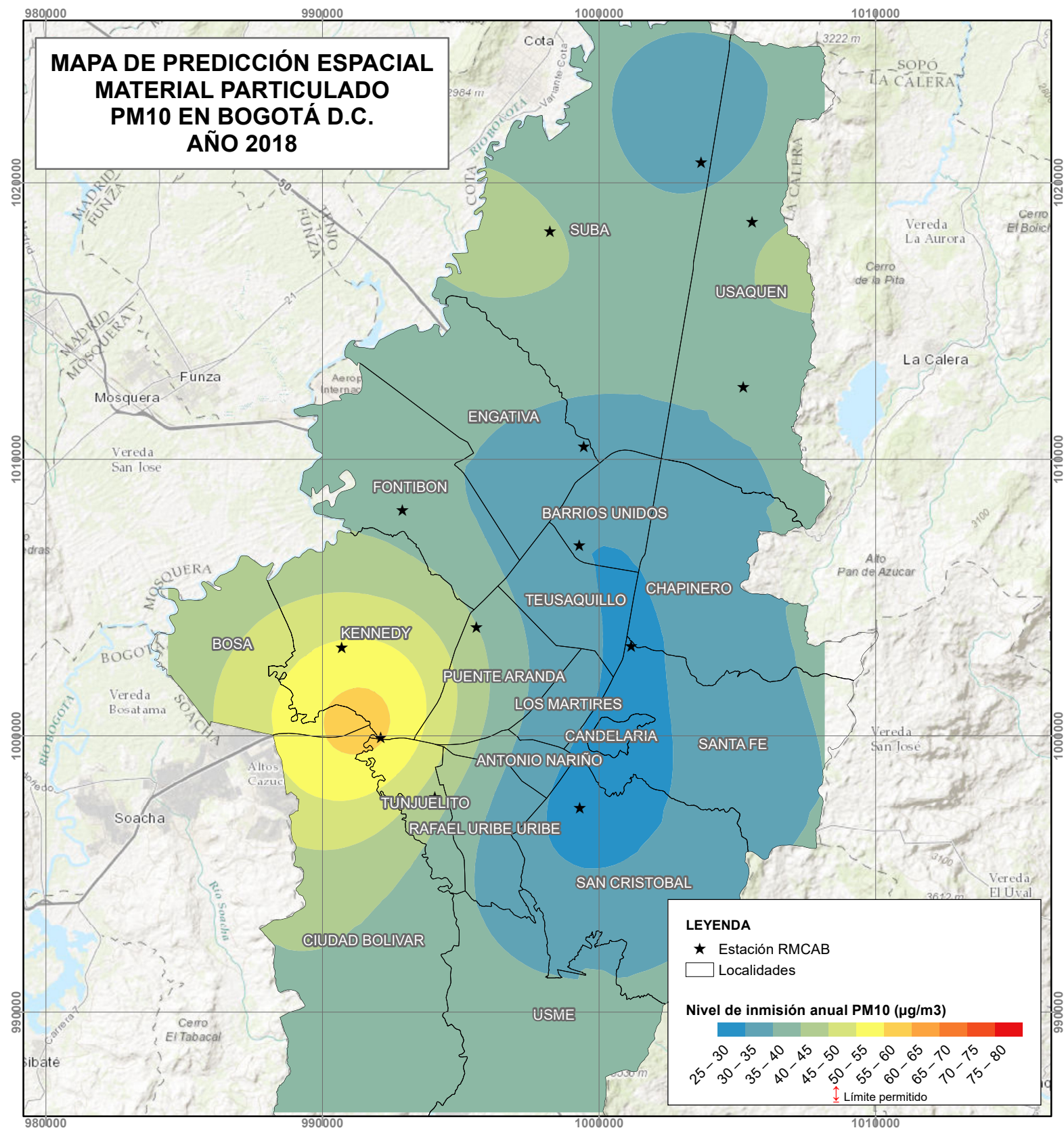




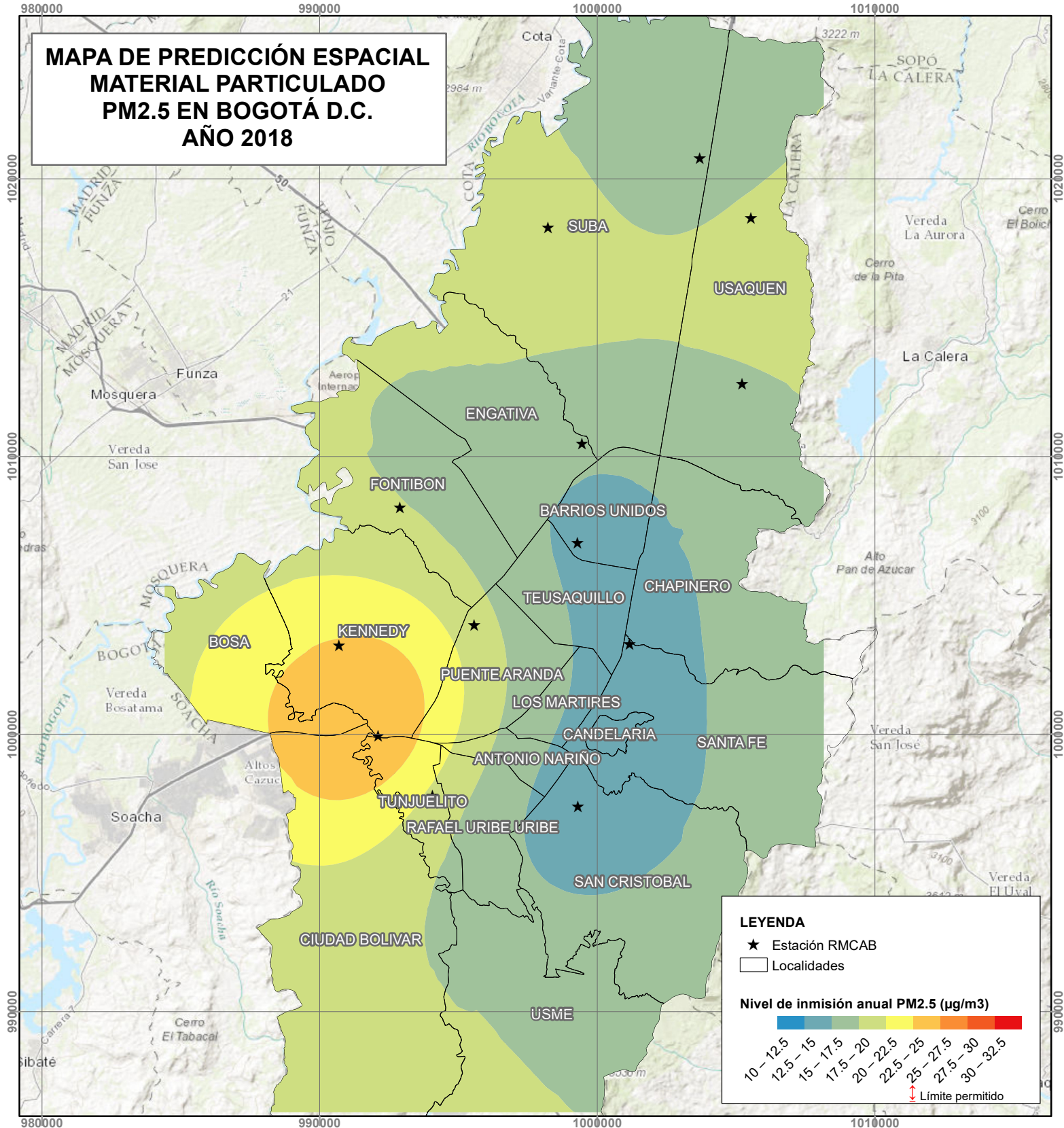




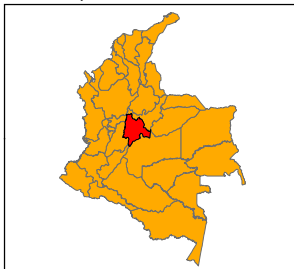




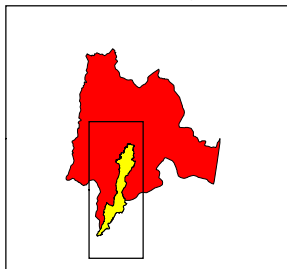
MAPA DE PREDICCIÓN ESPACIAL MATERIAL PARTICULADO PM2.5 EN BOGOTÁ D.C. AÑO 2018



LOCALIZACIÓN NACIONAL República de Colombia

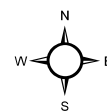


LOCALIZACIÓN REGIONAL Cundinamarca, Bogotá D.C.

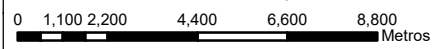


SISTEMA DE REFERENCIA CARTOGRÁFICA

Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota
Projection: Transverse Mercator
Datum: MAGNA
False Easting: 1,000,000.0000
False Northing: 1,000,000.0000
Central Meridian: -74.0775
Scale Factor: 1.0000
Latitude Of Origin: 4.5962
Units: Meter



ESCALA: 1:185,000



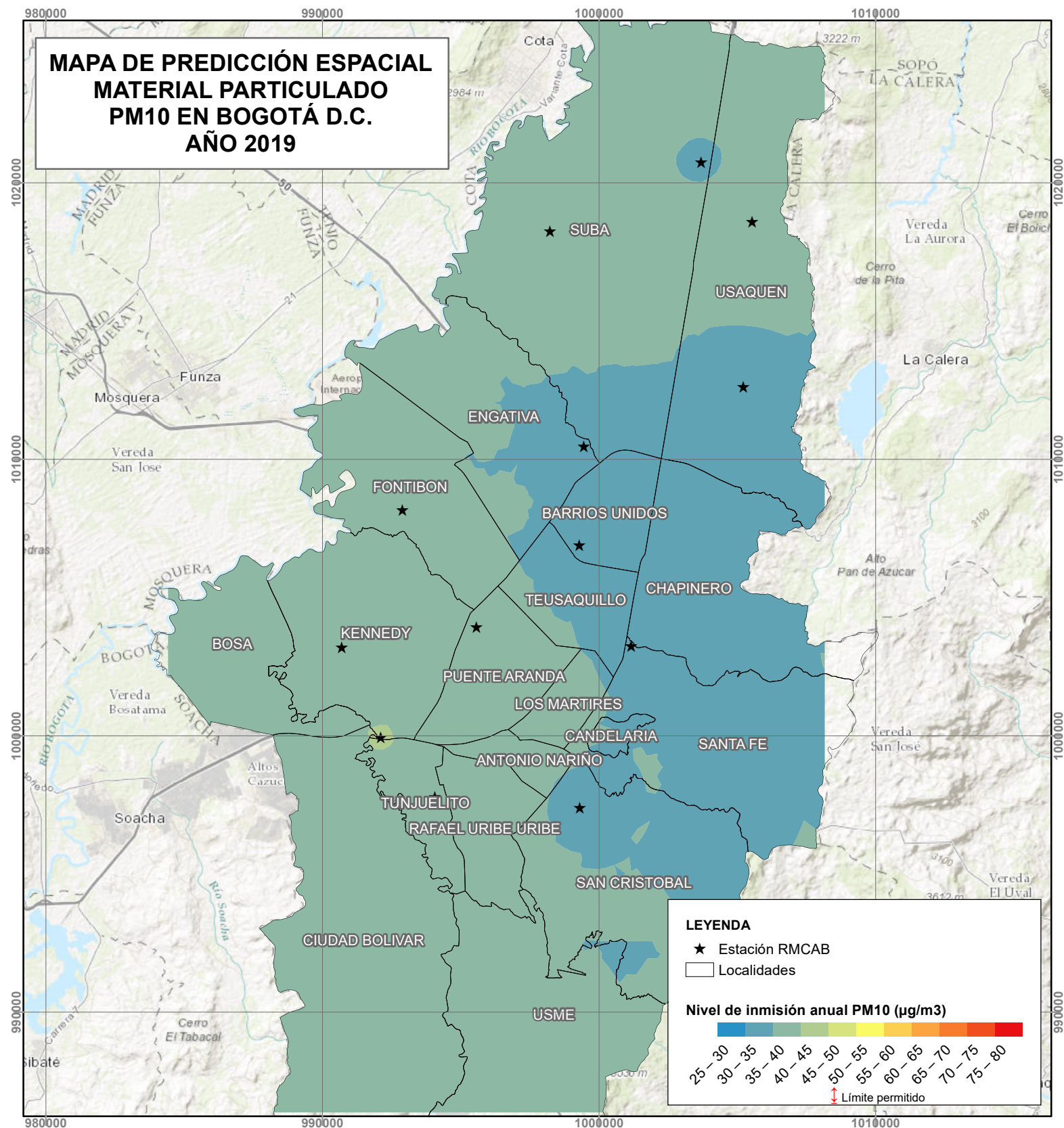
REPÚBLICA DE COLOMBIA

Universidad Militar Nueva Granada

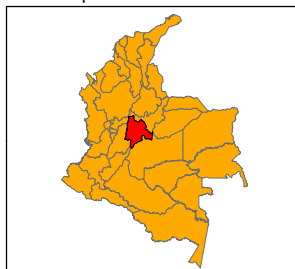


Elaborado por:
Wendi Garzón Herrera

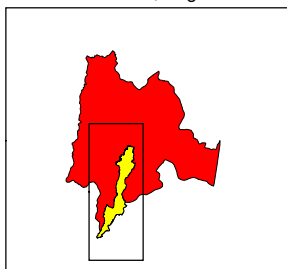
Fecha: 14/01/2021



LOCALIZACIÓN NACIONAL
República de Colombia

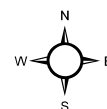


LOCALIZACIÓN REGIONAL
Cundinamarca, Bogotá D.C.

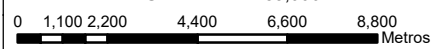


SISTEMA DE REFERENCIA CARTOGRÁFICA

Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota
Projection: Transverse Mercator
Datum: MAGNA
False Easting: 1,000,000.0000
False Northing: 1,000,000.0000
Central Meridian: -74.0775
Scale Factor: 1.0000
Latitude Of Origin: 4.5962
Units: Meter



ESCALA: 1:185,000



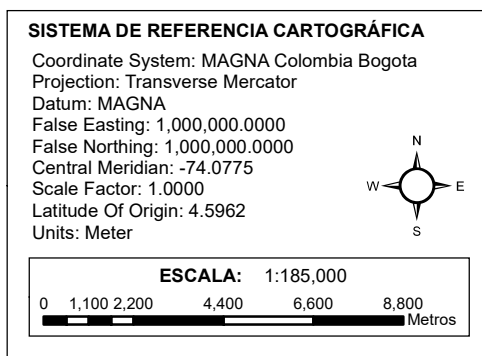
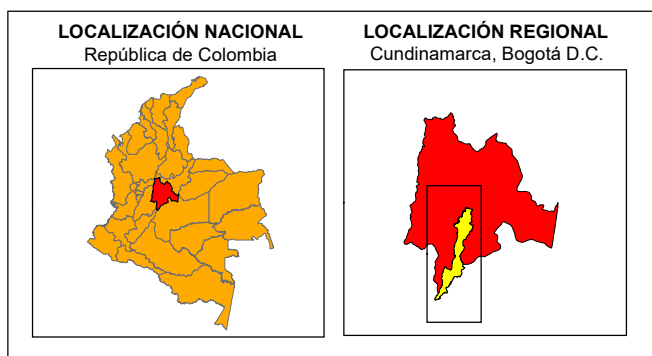
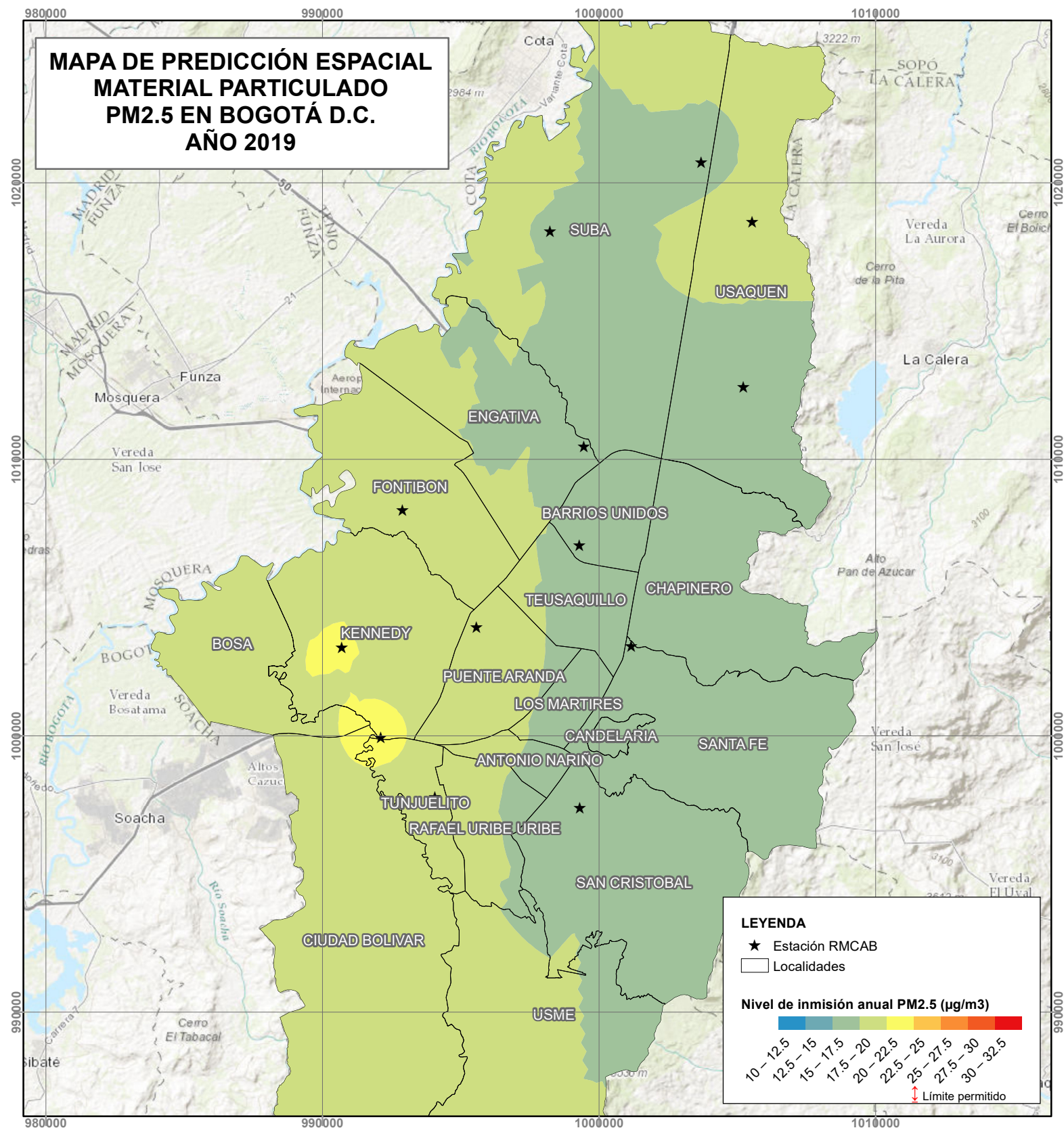
REPÚBLICA DE COLOMBIA

Universidad Militar Nueva Granada

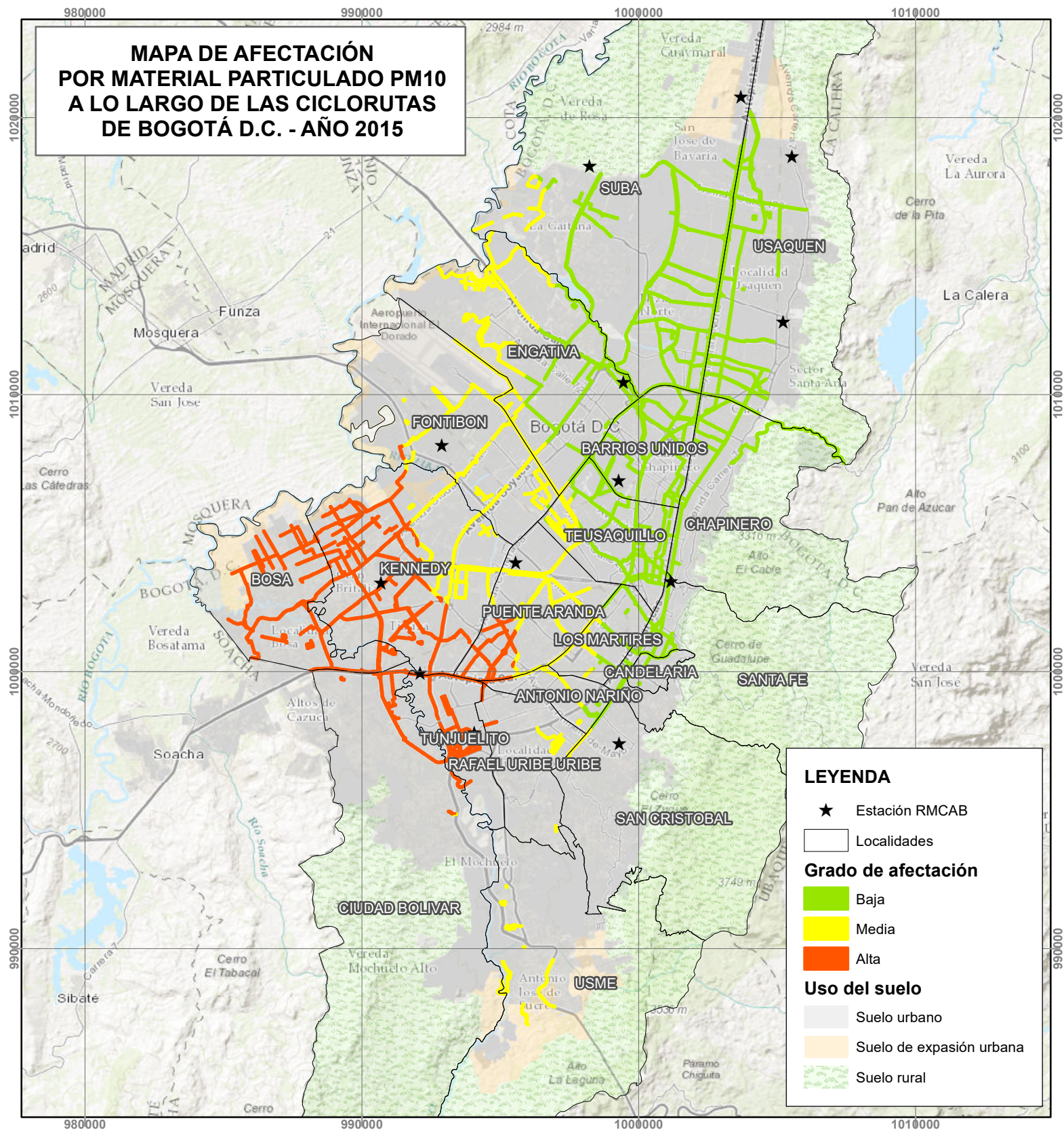


Elaborado por:
Wendi Garzón Herrera

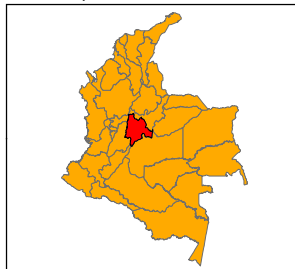
Fecha: 14/01/2021



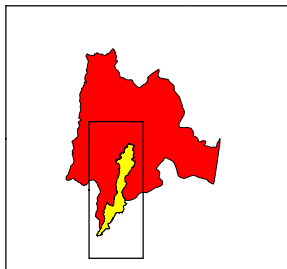
ANEXO B. MAPAS DE AFECTACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO PM10 Y PM2.5 A LO LARGO DE LAS CICLORUTAS DE BOGOTÁ, PARA LOS AÑOS 2015, 2016, 2017, 2018 Y 2019



LOCALIZACIÓN NACIONAL
República de Colombia

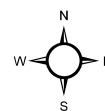


LOCALIZACIÓN REGIONAL
Cundinamarca, Bogotá D.C.

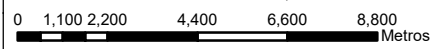


SISTEMA DE REFERENCIA CARTOGRÁFICA

Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota
Projection: Transverse Mercator
Datum: MAGNA
False Easting: 1,000,000.0000
False Northing: 1,000,000.0000
Central Meridian: -74.0775
Scale Factor: 1.0000
Latitude Of Origin: 4.5962
Units: Meter



ESCALA: 1:185,000



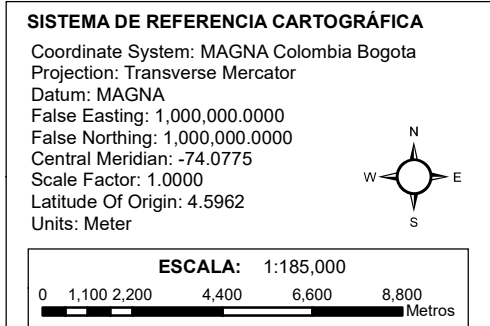
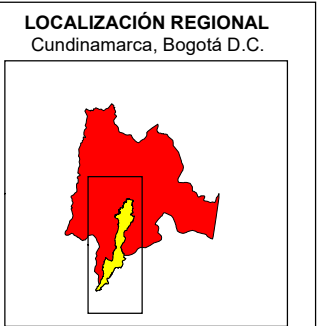
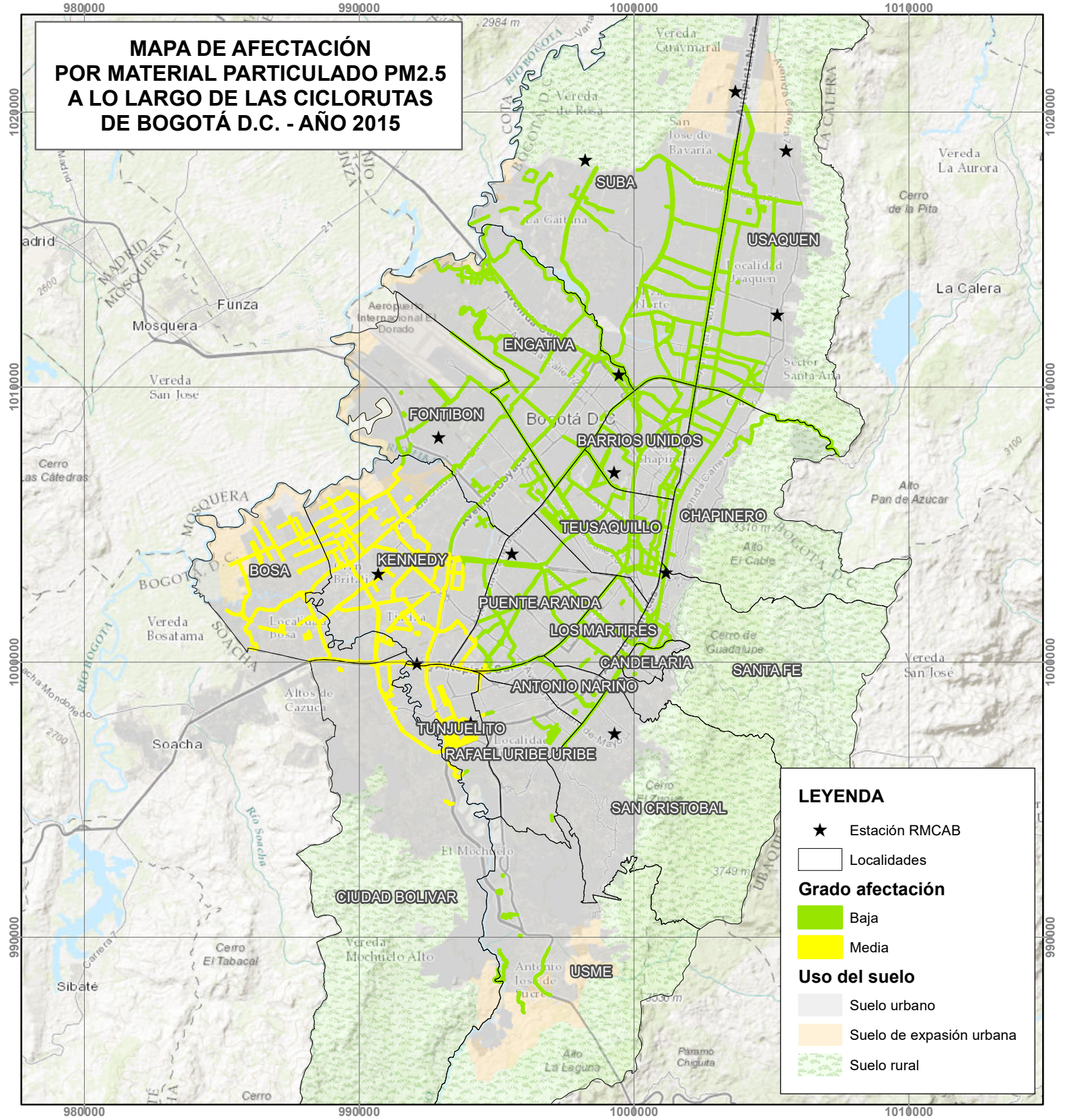
REPÚBLICA DE COLOMBIA

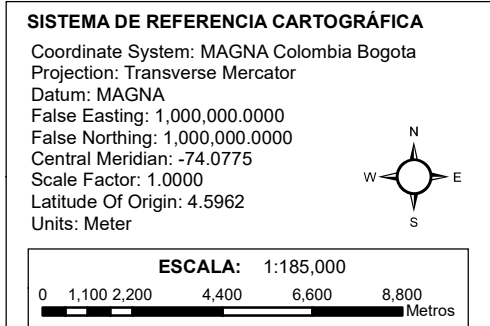
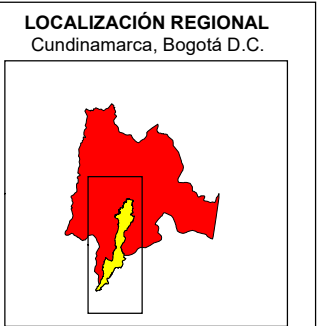
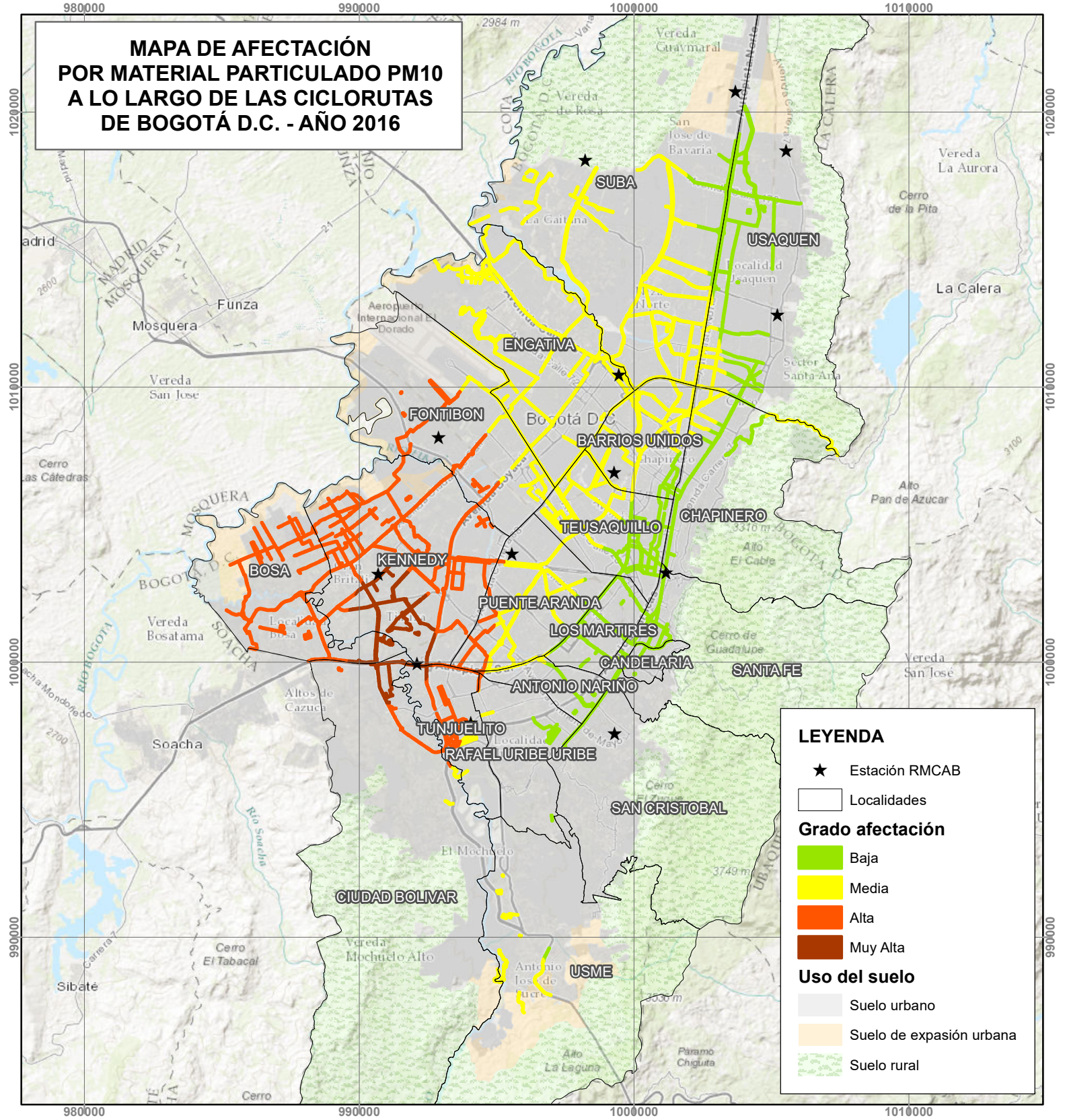
Universidad Militar Nueva Granada

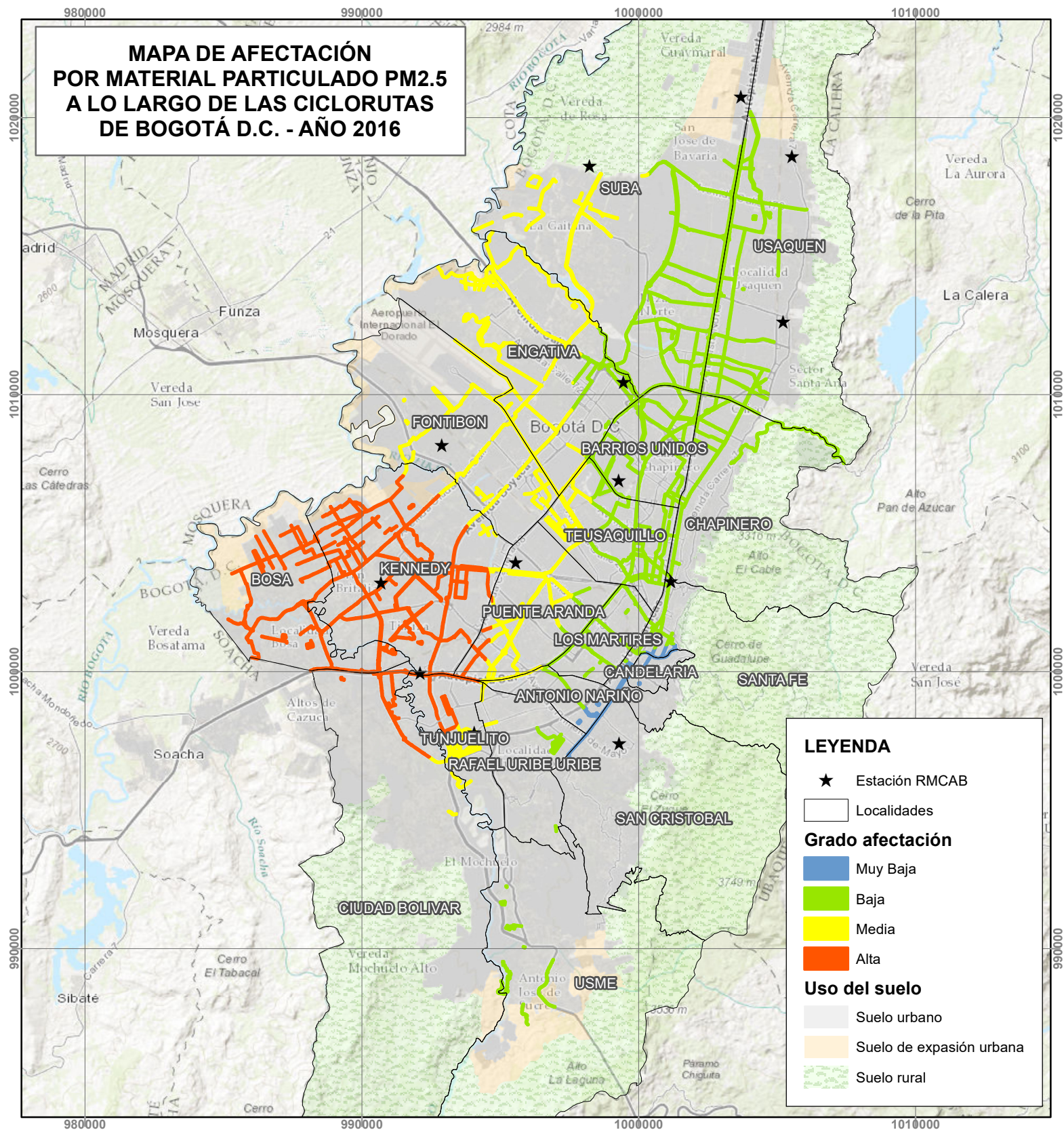


Elaborado por:
Wendi Garzón Herrera

Fecha: 3/12/2020

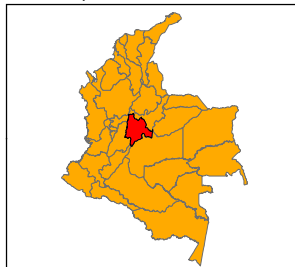






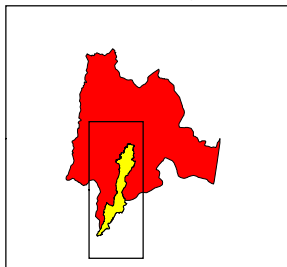
LOCALIZACIÓN NACIONAL

República de Colombia



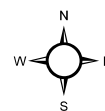
LOCALIZACIÓN REGIONAL

Cundinamarca, Bogotá D.C.

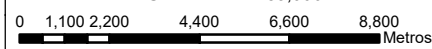


SISTEMA DE REFERENCIA CARTOGRÁFICA

Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota
Projection: Transverse Mercator
Datum: MAGNA
False Easting: 1,000,000.0000
False Northing: 1,000,000.0000
Central Meridian: -74.0775
Scale Factor: 1.0000
Latitude Of Origin: 4.5962
Units: Meter



ESCALA: 1:185,000



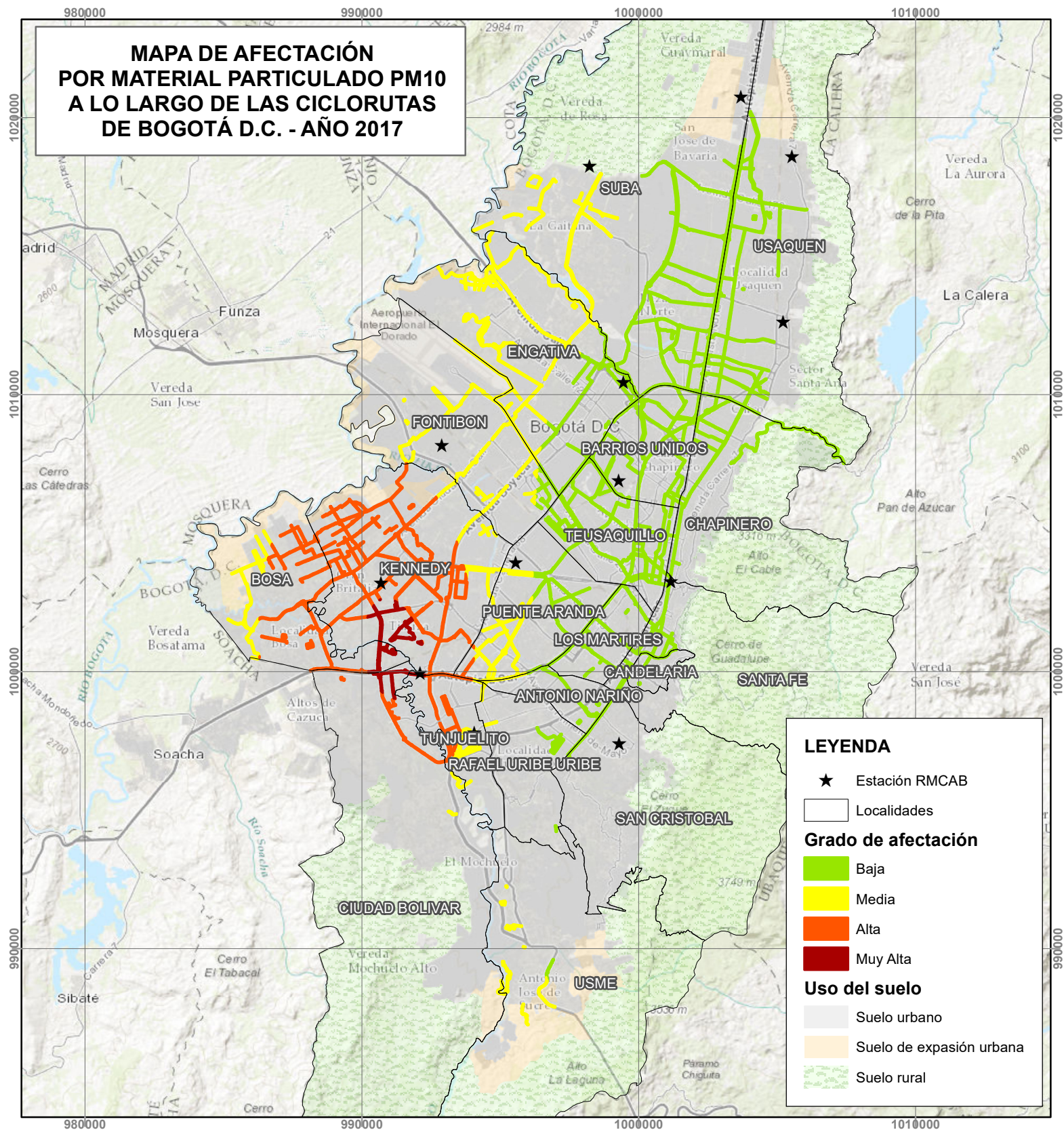
REPÚBLICA DE COLOMBIA

Universidad Militar Nueva Granada



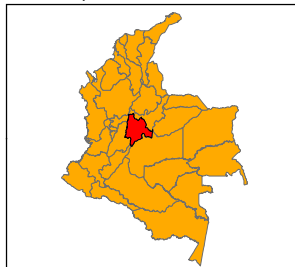
Elaborado por:
Wendi Garzón Herrera

Fecha: 3/12/2020



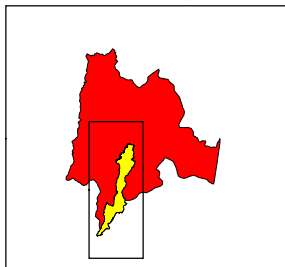
LOCALIZACIÓN NACIONAL

República de Colombia



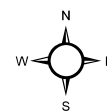
LOCALIZACIÓN REGIONAL

Cundinamarca, Bogotá D.C.

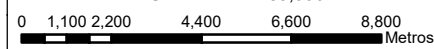


SISTEMA DE REFERENCIA CARTOGRÁFICA

Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota
Projection: Transverse Mercator
Datum: MAGNA
False Easting: 1,000,000.0000
False Northing: 1,000,000.0000
Central Meridian: -74.0775
Scale Factor: 1.0000
Latitude Of Origin: 4.5962
Units: Meter



ESCALA: 1:185,000



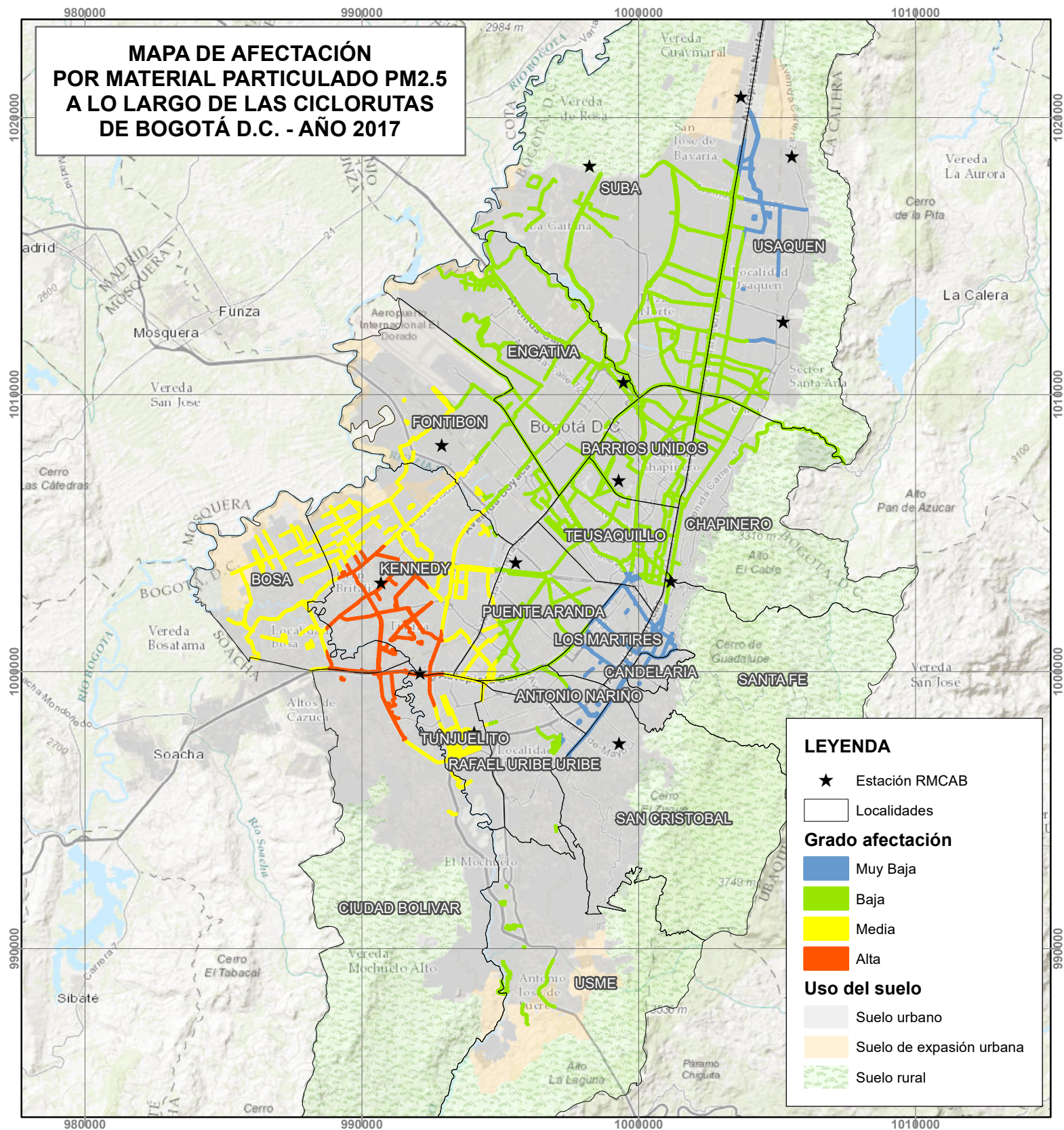
REPÚBLICA DE COLOMBIA

Universidad Militar Nueva Granada



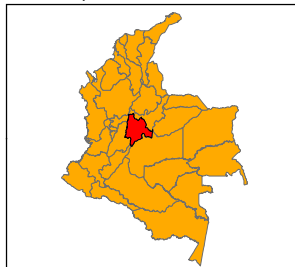
Elaborado por:
Wendi Garzón Herrera

Fecha: 3/12/2020



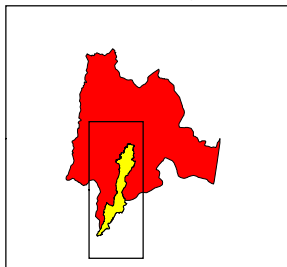
LOCALIZACIÓN NACIONAL

República de Colombia



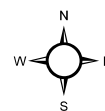
LOCALIZACIÓN REGIONAL

Cundinamarca, Bogotá D.C.

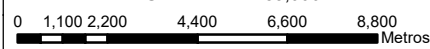


SISTEMA DE REFERENCIA CARTOGRÁFICA

Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota
Projection: Transverse Mercator
Datum: MAGNA
False Easting: 1,000,000.0000
False Northing: 1,000,000.0000
Central Meridian: -74.0775
Scale Factor: 1.0000
Latitude Of Origin: 4.5962
Units: Meter



ESCALA: 1:185,000



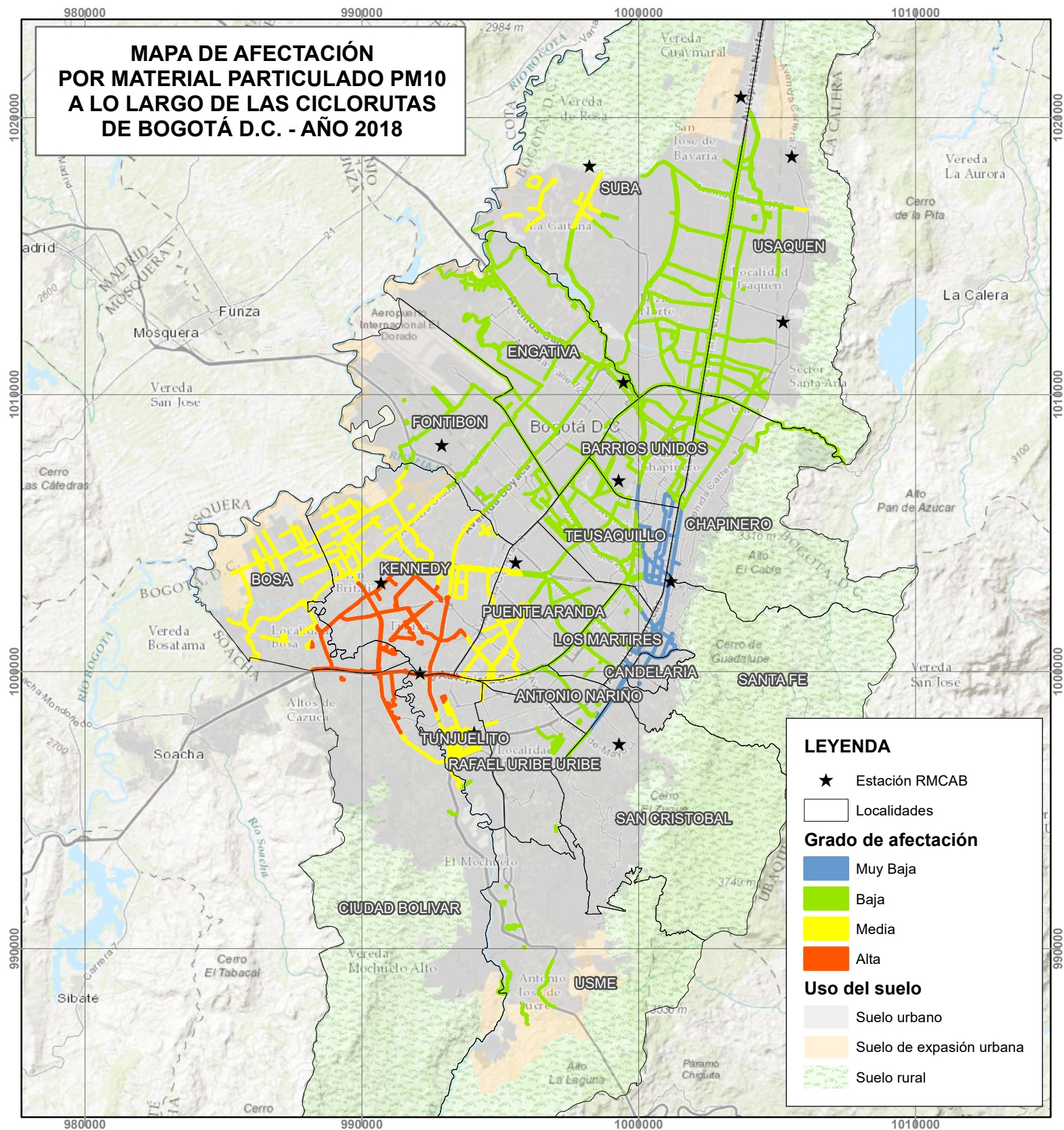
REPÚBLICA DE COLOMBIA

Universidad Militar Nueva Granada



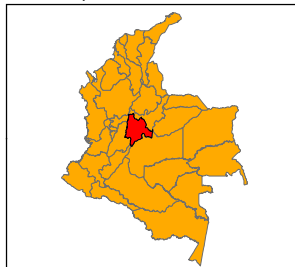
Elaborado por:
Wendi Garzón Herrera

Fecha: 3/12/2020



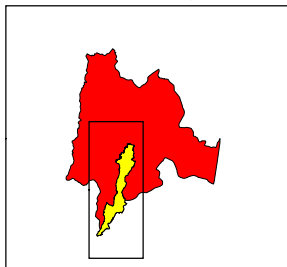
LOCALIZACIÓN NACIONAL

República de Colombia



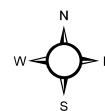
LOCALIZACIÓN REGIONAL

Cundinamarca, Bogotá D.C.

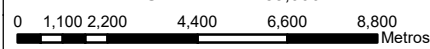


SISTEMA DE REFERENCIA CARTOGRÁFICA

Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota
Projection: Transverse Mercator
Datum: MAGNA
False Easting: 1,000,000.0000
False Northing: 1,000,000.0000
Central Meridian: -74.0775
Scale Factor: 1.0000
Latitude Of Origin: 4.5962
Units: Meter



ESCALA: 1:185,000



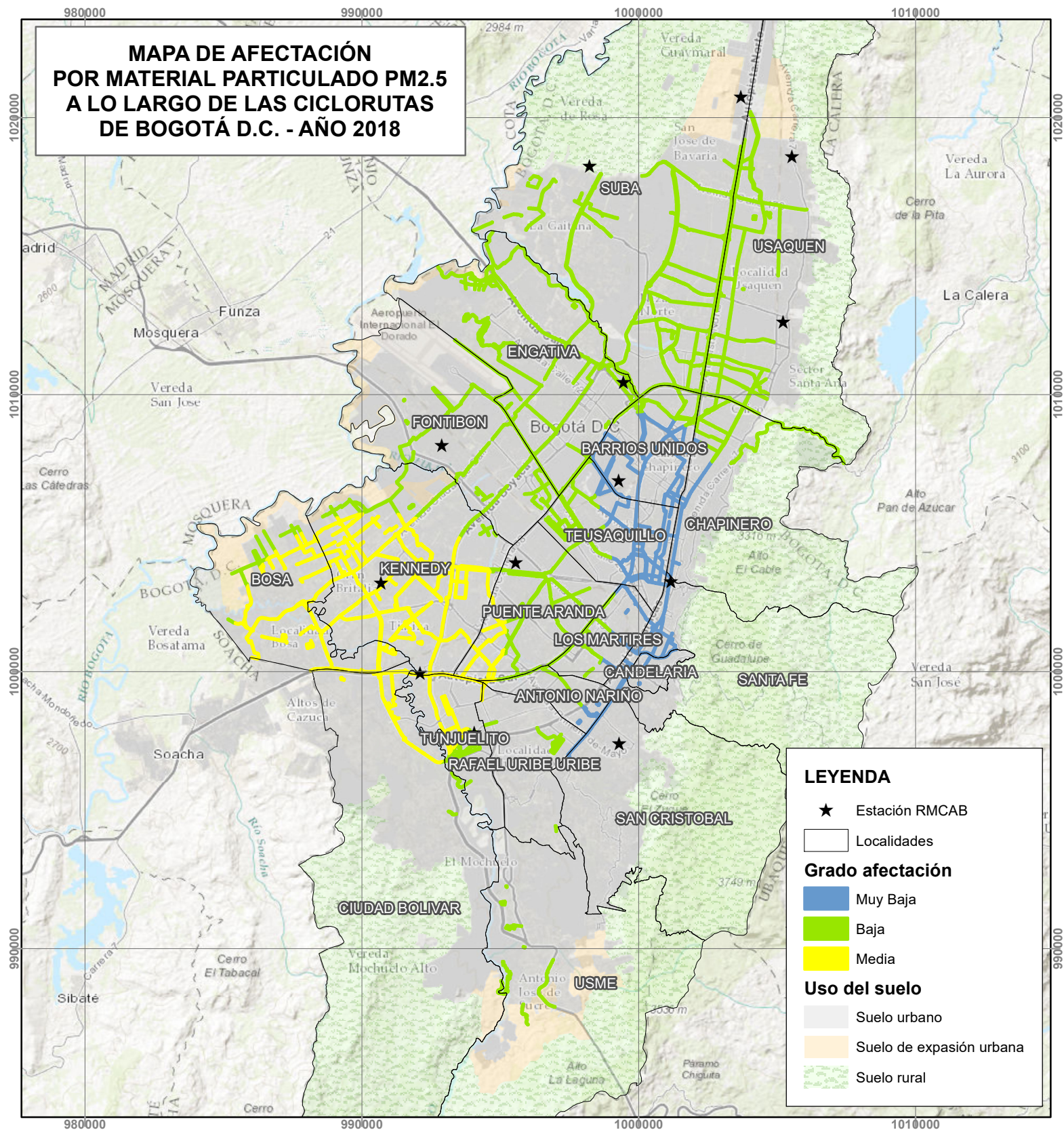
REPÚBLICA DE COLOMBIA

Universidad Militar Nueva Granada



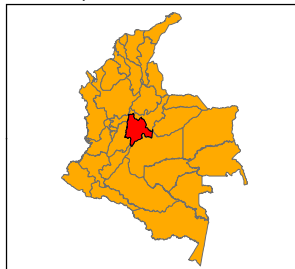
Elaborado por:
Wendi Garzón Herrera

Fecha: 3/12/2020



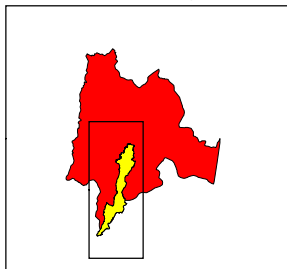
LOCALIZACIÓN NACIONAL

República de Colombia



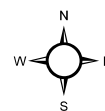
LOCALIZACIÓN REGIONAL

Cundinamarca, Bogotá D.C.

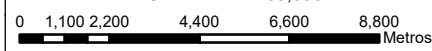


SISTEMA DE REFERENCIA CARTOGRÁFICA

Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota
Projection: Transverse Mercator
Datum: MAGNA
False Easting: 1,000,000.0000
False Northing: 1,000,000.0000
Central Meridian: -74.0775
Scale Factor: 1.0000
Latitude Of Origin: 4.5962
Units: Meter



ESCALA: 1:185,000



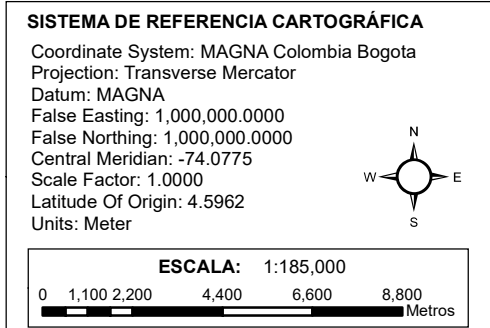
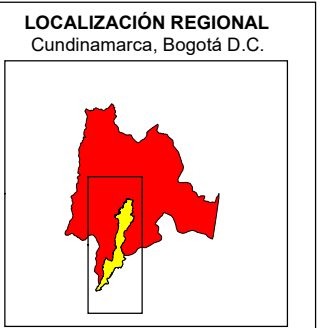
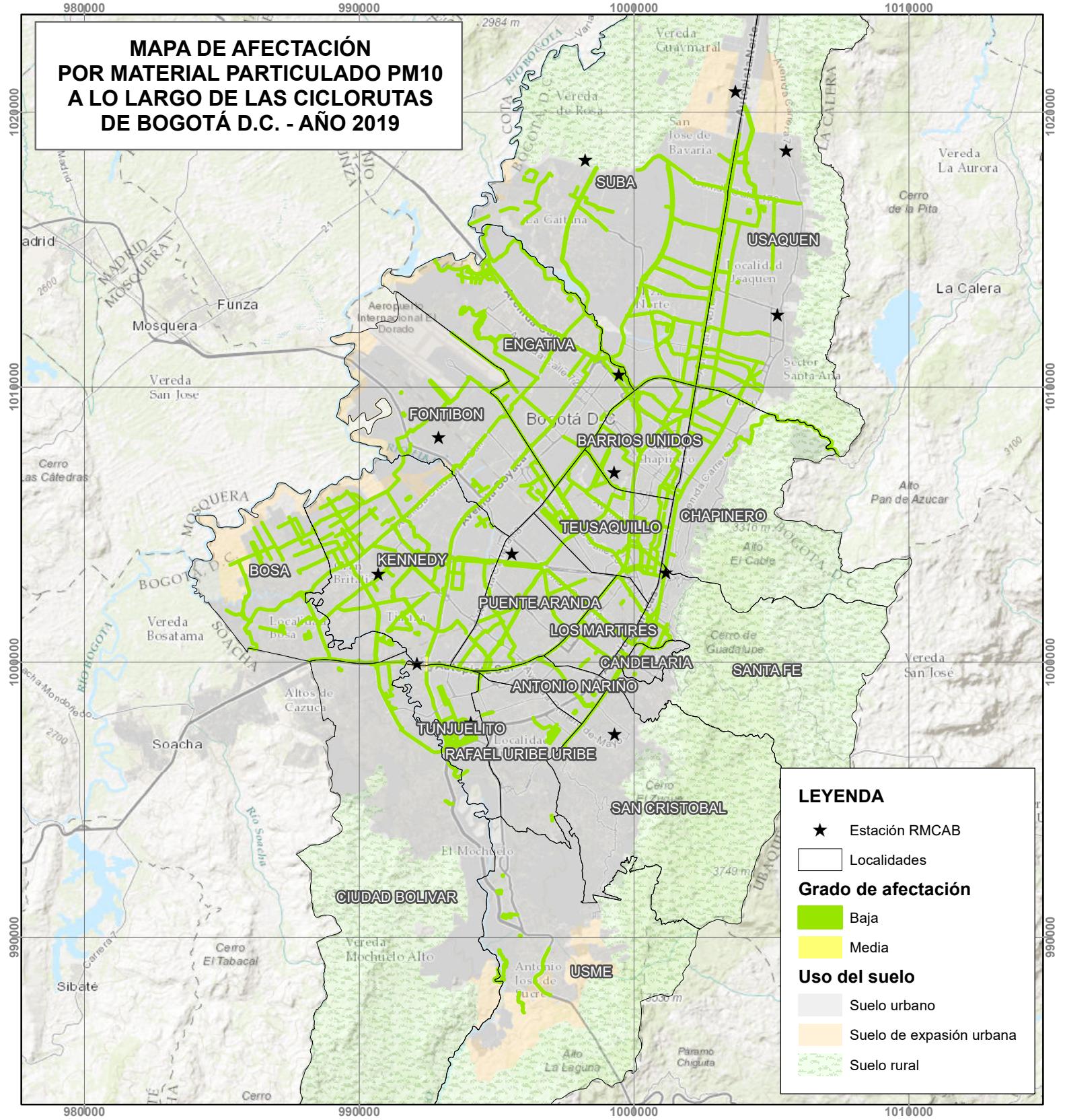
REPÚBLICA DE COLOMBIA

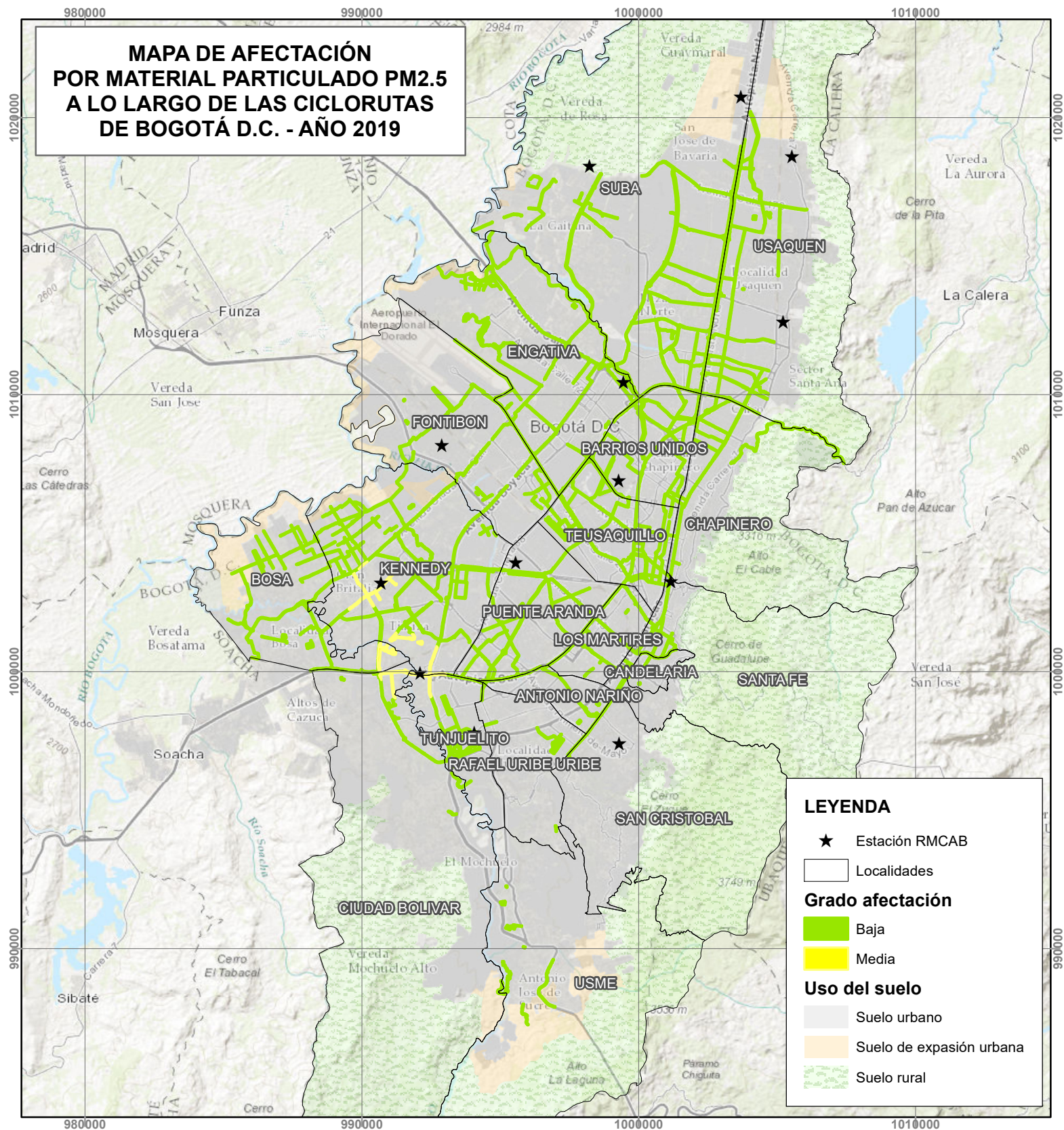
Universidad Militar Nueva Granada



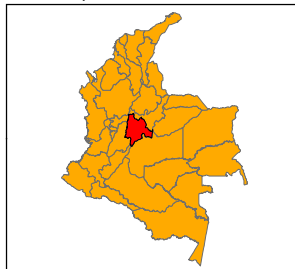
Elaborado por:
Wendi Garzón Herrera

Fecha: 3/12/2020

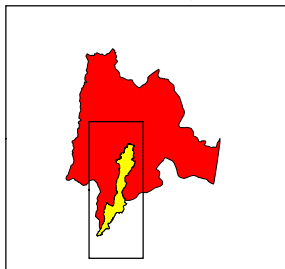




LOCALIZACIÓN NACIONAL
República de Colombia

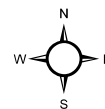


LOCALIZACIÓN REGIONAL
Cundinamarca, Bogotá D.C.

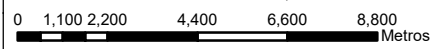


SISTEMA DE REFERENCIA CARTOGRÁFICA

Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota
Projection: Transverse Mercator
Datum: MAGNA
False Easting: 1,000,000.0000
False Northing: 1,000,000.0000
Central Meridian: -74.0775
Scale Factor: 1.0000
Latitude Of Origin: 4.5962
Units: Meter



ESCALA: 1:185,000



REPÚBLICA DE COLOMBIA

Universidad Militar Nueva Granada



Elaborado por:
Wendi Garzón Herrera

Fecha: 3/12/2020